

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ «НЕФТИ И ГАЗА ИМ. М.С. ГУЦЕРИЕВА»
Кафедра «ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»

В.П. Иванников

ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ.
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Ижевск 2020

УДК 620.22(075.8)
ББК 30.36.я73
И 199

Рецензент: доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО Ломаев Г.В.

И 199 Иванников В.П.

Основы материаловедения. Конструкционные материалы и технологии: Учебное пособие. _ Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет», 2020. 411 с.

ISBN 978-5-4312-0781-5

В первой и второй главах учебного пособия рассматриваются основы кристаллического строения материалов, основные закономерности процесса кристаллизации, агрегатные состояния, свойства железоуглеродистых сплавов, технологии термической обработки металлов и сплавов. В третьей и четвёртой главах достаточно подробно рассмотрены технологические, физические, механические свойства металлов и сплавов, технологии и методы исследования их характеристик. Пятая глава посвящена вопросам классификации железоуглеродистых сплавов для электро- и теплоэнергетики, титановых, медных и алюминиевых сплавов, конструкционных материалов на основе полимеров, пластмассы и композитов. В шестой главе рассмотрены технологии металлургического и литейного производства, оборудование для горячей и холодной обработки металлов давлением и резанием, получения сварных соединений, технологии изготовления изделий методами порошковой металлургии, производства полимерных материалов и изделий.

Учебное пособие написано в связи с необходимостью дальнейшего развития методического обеспечения и повышения качества обучения студентов кафедры «Теплоэнергетика» УдГУ в соответствии с ФГОС ВО, рабочими программами по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов» по направлениям подготовки 13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника», 21.03.01 – «Нефтегазовое дело» и 20.04.01 - «Техносферная безопасность».

УДК 620.22(075.8)
ББК 30.36.я73

ISBN 978-5-4312-0781-5

© В.П. Иванников, 2020
© ФГБОУ ВО Удмуртский государственный университет, 2020

	стр.	
ВВЕДЕНИЕ	5	
ГЛАВА I. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	8	
§ I.1. Металлы. Кристаллическая структура	8	
1.1.1. Свойства металлов как следствие особенностей междоатомной связи	8	
1.1.2. Классификация кристаллов по видам химической связи между атомами	11	
§ I.2. Реальная структура металлов и дефекты кристаллических решеток	17	
1.2.1. Точечные дефекты кристаллического строения	19	
1.2.2. Линейные дефекты кристаллической решетки	20	
1.2.3. Анизотропия кристаллов	25	
1.2.4. Полиморфизм металлов	30	
ГЛАВА II. СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ	37	
§ II.1. Агрегатные состояния и основные закономерности процесса кристаллизации металлов	37	
II.1.1. Основные закономерности процесса кристаллизации металлов	40	
§ II.2. Металлические сплавы	42	
§ II.3. Железо и его сплавы	45	
II.3.1. Диаграммы состояния	45	
II.3.2. Диаграмма состояния системы железо-углерод	48	
II.3.3. Углеродистые стали	60	
§ II.4. Влияние нагрева и скорости охлаждения углеродистой стали на ее структуру	63	
II.4.1. Отжиг и нормализация углеродистых сталей	66	
II.4.2. Закалка и отпуск	71	
II.4.3. Отпуск закаленных углеродистых сплавов	73	
§ II.5. Чугуны	73	
II.5.1. Классификация и свойства чугунов	74	
II.5.2. Изменения структуры чугунов при охлаждении	88	
ГЛАВА III. ФИЗИЧЕСКИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	91	
§ III.1. Физические и химические свойства	91	
§ III.2. Механические свойства металлов и сплавов	103	
§ III.3. Технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов	128	
§ III.4. Особенности определения некоторых механических свойств металлов и сплавов	136	
§ III.5. Упругая и пластическая деформации, наклеп и рекристаллизация	140	
ГЛАВА IV. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	146	
§ IV.1. Металлография сплавов на основе железа	153	
IV.1.1. Металлографические методы выявления структуры металлов и сплавов	153	

IV.1.2. Микроструктуры сталей при различных термических обработках	176
IV.1.3. Микроструктуры чугунов	182
IV.1.4. Микроструктура алюминия и его сплавов	187
IV.1.5. Микроструктура меди и ее сплавов	191
§ IV.2. Современные методы, средства и технологии исследования металлов и сплавов	195
IV.2.1. Рентгеноструктурный анализ и рентгеновская дефектоскопия	195
IV.2.2. Электронная микроскопия	206
IV.2.3. Дефектоскопия. Методы неразрушающего контроля металлов и сплавов	222
ГЛАВА V. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	228
§ V.1. Конструкционные стали и сплавы	228
V.1.1. Классификация сталей	228
V.1.2. Свойства сталей, обеспечивающие устойчивость к воздействию температуры и рабочей среды	234
§ V.2. Железоуглеродистые сплавы для электро- и теплоэнергетики	259
V.2.1. Материалы котельных установок и паровых турбин	259
§ V.3. Титановые, медные и алюминиевые сплавы	269
V.3.1. Титан и его сплавы	269
V.3.2. Медь и её сплавы	275
V.3.3. Алюминий и его сплавы	281
§ V.4. Неметаллические материалы	289
V.4.1. Полимеры и пластмассы	289
V.4.2. Резиновые и клеящие материалы	293
V.4.3. Стекло, ситаллы, графит	295
V.4.4. Композиционные материалы	299
ГЛАВА VI. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	305
§ VI.1. Основные способы литья металлов	307
§ VI.2. Применение литья в машиностроении	310
§ VI.3. Горячая и холодная обработка металлов давлением	323
§ VI.4. Волочение и прессование	332
§ VI.5. Способы обработки резанием, станки и инструменты	336
VI.5.1. Применяемое оборудование и инструменты для резания	337
VI.5.2. Оборудование для горячей и холодной обработки металлов давлением	345
§ VI.6. Характеристика способов сварки и схематизация сварочных процессов	353
§ VI.7. Технология изготовления деталей методом порошковой металлургии	363
VI.7.1. Получение порошка исходного материала	364
VI.7.2. Формование металлических порошков	370
VI.7.3. Спекание и доводка заготовок	378
§ VI.8. Технологии производства изделий из полимерных материалов	386
VI.8.1. Способы формообразования деталей из полимеров в вязкотекучем состоянии и технологическое оборудование	386
VI.8.2. Материалы и методы создания изделий из полимеров	398
ЛИТЕРАТУРА	402

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение и технология конструкционных материалов относятся к числу базовых учебных дисциплин для большинства направлений подготовки специалистов инженерно-технических специальностей. Это научное направление изучающее связь между составом, строением и свойствами материалов, а также их изменения при различных внешних воздействиях (тепловом, механическом, химическом и т.д.). Основная практическая задача – изыскание оптимального состава, способа получения и обработки материалов для придания им заданных свойств.

Условно это направление разделяется на *теоретическое материаловедение*, рассматривающее общие закономерности строения и процессов, происходящих в материалах при различных воздействиях и *прикладное (техническое)*, изучающее основы технологических процессов обработки (термическая обработка, литье, обработка давлением) и конкретные классы материалов.

В электроэнергетике используются весьма различные материалы, однако основными конструкционными материалами являются металлы. Поэтому содержание курса начинается с изучения основ металловедения.

Проблемы материаловедения в отношении металлов, главным образом связано с необходимостью изучения особенностей строения кристаллической структуры и свойств металлов и сплавов в их взаимосвязи, таких как: механические (прочность, вязкость и твёрдость); химические (сопротивление действию агрессивной среды); физические (магнитные, электрические, объёмные и тепловые); технологические (жидкотекучесть, штампуемость, обрабатываемость режущим инструментом, прокаливаемость и т.д.). И все эти проблемы объединены понятием «*металловедение*» [1].

Российские ученые сыграли ведущую роль в развитии металловедения. Одним из них является П. П. Аносов, который в 1831 году впервые применил микроскоп в разработке методики исследования стали. В 1868 г. Д. К. Чернов

открытием критических точек в стали установил подлинно научную причину изменения ее свойств при термической обработке, за что получил международное признание. Существенный вклад в развитие науки о металлах внесли Н. С. Курнаков, А. А. Байков, А. М. Бочвар, Н. А. Минкевич, С. С. Штейнберг, А. П. Гуляев и другие российские ученые, а из зарубежных – А. Ледебур, Р. Аустен, Ф. Осмонд, Л. Троост, А. Мартенс и др.

Особенно интенсивно развивается материаловедение в последние десятилетия. Это объясняется потребностью в новых материалах для исследования космоса, развития электроники, Электроэнергетики, в том числе ядерной. Для этого понадобилось включение в число промышленных материалов почти всех элементов периодической системы.

Неметаллическое материаловедение наибольшее развитие получило при создании синтетических материалов, в которых возможно проектировать и комбинировать свойства исходных веществ с целью получения заданных свойств конечного продукта и готовых изделий.

Основы структурной теории химического строения органических соединений заложил великий русский химик А. М. Бутлеров (1826–1886 гг.).

На основе исследований Г. С. Петрова (1907–1914 гг.) стало возможным промышленное производство первых синтетических фенопластов. Цепная полимеризация стала возможной в результате разработки Н. Н. Семеновым (1930–1940 г. г.) теории цепных реакций.

Содержание учебного пособия условно сгруппировано в 6-ти главах. В первой и второй главах учебного пособия рассматриваются основы кристаллического строения материалов, основные закономерности процесса кристаллизации, агрегатные состояния, свойства железоуглеродистых сплавов, технологии термической обработки металлов и сплавов. Важные физические понятия напряжений и деформаций рассмотрены не только с позиций физики твердого тела, но и на основе феноменологического подхода, с позиций механики сплошной среды. Даны определения основных механических характеристик материалов, описаны основные методы

механических испытаний, рассмотрены закономерности упрочнения и разупрочнения материалов при их деформации и нагреве.

Описаны методика и правила построения диаграмм фазового равновесия (диаграмм состояния), рассмотрены основные типы диаграмм состояния сплавов, обладающих различной способностью к образованию твердых растворов, химических соединений или превращений в твердом состоянии.

В третьей и четвёртой главах достаточно подробно рассмотрены технологические, физические, механические свойства металлов и сплавов, технологии и методы исследования их характеристик, рассмотрено влияние легирования на свойства сталей, методы упрочнения сплавов. Особое внимание уделено коррозионно-стойким, жаростойким и жаропрочным сплавам, а также инструментальным сталям и другим инструментальным материалам для обработки металлов давлением и резанием.

Пятая глава посвящена вопросам классификации железоуглеродистых сплавов для электро- и теплоэнергетики, титановых, медных и алюминиевых сплавов, конструкционных материалов на основе полимеров, пластмассы и композитов. В шестой главе рассмотрены технологии металлургического и литейного производства, оборудование для горячей и холодной обработки металлов давлением и резанием, получения сварных соединений, технологии изготовления изделий методами порошковой металлургии, производства полимерных материалов и изделий.

Учебное пособие написано в связи с необходимостью дальнейшего развития методического обеспечения и повышения качества обучения студентов кафедры «Теплоэнергетика» УдГУ в соответствии с ФГОС ВО, рабочими программами по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов» по направлениям подготовки 13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника», 21.03.01 - «Нефтегазовое дело» и 20.04.01 - «Техносферная безопасность».

ГЛАВА I

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

§ 1.1. Металлы. Кристаллическая структура

1.1.1. Свойства металлов как следствие особенностей межуатомной связи

Кристаллом называется твердое тело, состоящее из атомов (ионов или молекул), расположенных с периодической повторяемостью в трех измерениях.

Идеальный кристалл можно построить путем бесконечного закономерного повторения в пространстве одинаковых структурных единиц (элементарных ячеек). Структурная единица кристалла - элементарная ячейка, может содержать несколько атомов или молекул.

Любую кристаллическую структуру можно описать с помощью периодически повторяющейся в пространстве элементарной части кристаллической решетки, называемой элементарной ячейкой (имеющей форму параллелепипеда - *рис. 1.1*), с каждой точкой которой связана некоторая группа атомов [2].

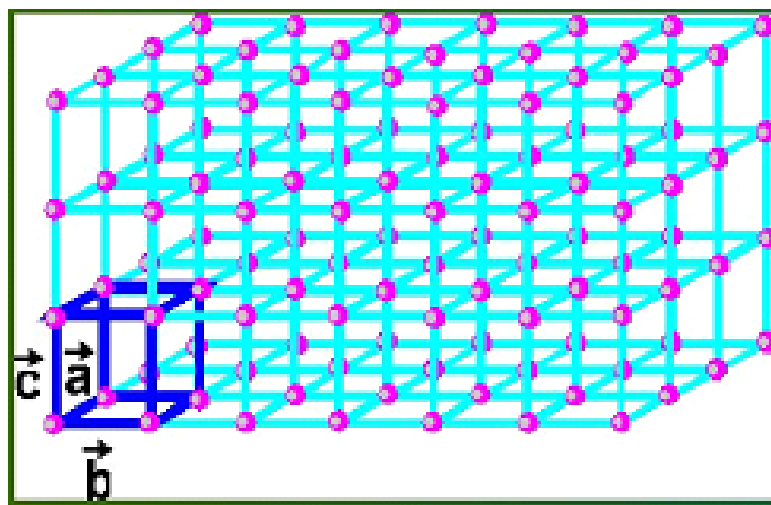


Рис. 1.1. Условный образ простейшей структурной единицы кристаллической решётки

Эта группа атомов называется базисом; *базис* повторяется в пространстве и образует *кристаллическую решетку*. Впервые понятие кристаллической решетки ввел *Огюст Бравэ - 1848 г.*

Введём три независимых *базисных вектора* $\mathbf{a}_1, \mathbf{b}_1, \mathbf{c}_1$ исходящих из одной точки и построим результирующий вектор

$$\vec{r} = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{b}_1 + n_3 \vec{c}_1. \quad (I.1)$$

Если n_1, n_2, n_3 , начиная с единицы, принимают последовательно все целочисленные значения, то формируется *пространственная решетка*, обладающая периодичностью по всем трем направлениям.

В кристаллографии за единицу измерения обычно принимают размер векторов $\mathbf{a}_1, \mathbf{b}_1, \mathbf{c}_1$ и в этом случае эти вектора называются *осевыми единицами*.

Параллелепипед, образованный базисными векторами называют элементарной ячейкой. Длину ребра *элементарной ячейки* вдоль одной из осей называют *постоянной* решетки. Поскольку α, β, γ – углы между базисными векторами могут принимать различные значения, то *элементарная ячейка* может иметь форму косоугольного параллелепипеда, призмы или куба. Постоянные решетки в разных направлениях также могут быть различными. Решетки данного вида принято называть простыми.

Ячейки, в которых атомы располагаются не только в вершинах, называются сложными. Более сложные пространственные решетки могут быть получены из простых решеток, взаимно сдвинутых на определенную величину. Простую решетку имеют обычно одноатомные кристаллы. Двух-, трёх-, четырехатомные кристаллы имеют более сложную решетку, состоящую соответственно из двух, трех или четырех вдвинутых друг в друга простых решеток.

Во всех вершинах элементарной ячейки располагаются одинаковые атомы или группы атомов, поэтому все вершины ячеек эквивалентны друг другу и их называют узлами решетки. Элементарные ячейки, атомы в

которых располагаются только в вершинах, называются простыми или примитивными, на каждую такую ячейку в среднем приходится один узел.

Важнейшим параметром кристаллической решетки является координационное число, указывающее число ближайших частиц, окружающих данную частицу кристалла.

Например, для кристалла $NaCl$ координационное число равно 6. Каждый атом Na окружен шестью ионами Cl , а каждый ион Cl – шестью ионами натрия.

Существуют пять типов двумерных решеток, а трехмерных пространственных решеток будет уже четырнадцать. Пространственные решетки Браве показаны на рис. 1.2.

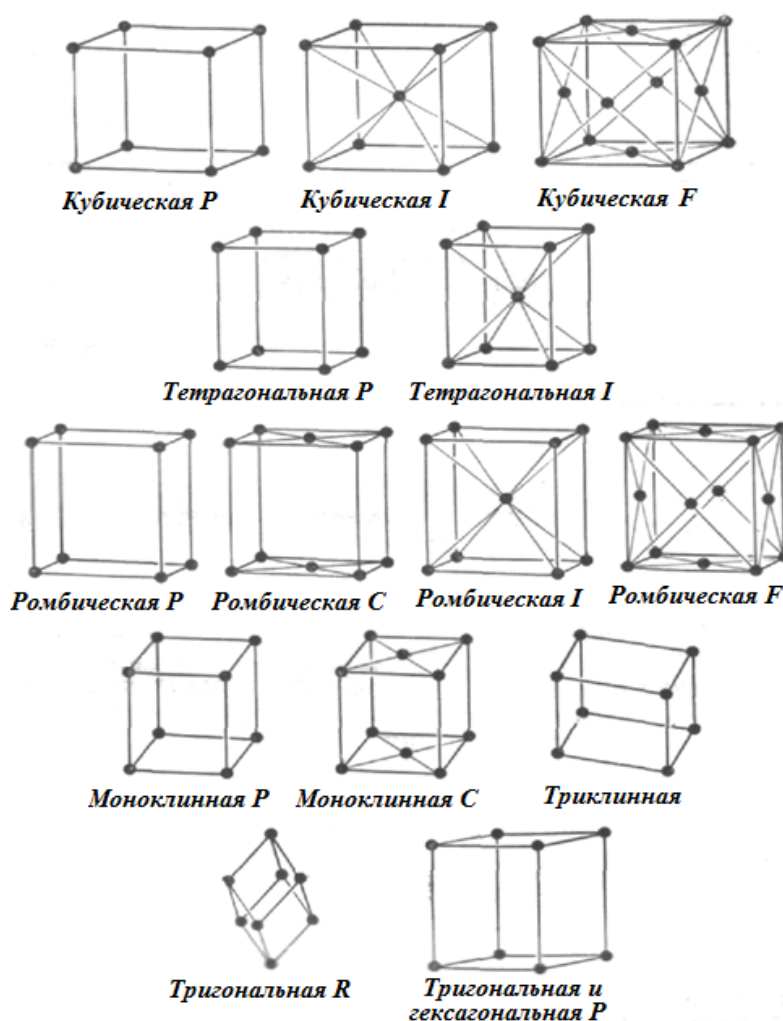


Рис. 1.2. Четырнадцать пространственных решеток Браве

* Показаны обычно используемые ячейки, которые не всегда являются примитивными. P — символ примитивной ячейки, I — объемноцентрированной, F — гранецентрированной, C — с центрированными основаниями, R — ромбоэдрической.

По взаимному расположению и соотношению базисных векторов кристаллические решетки объединяются в системы (*сингонии*: *син.* – на латыни «одинаковый», *гон.* – на латыни «угол»). *Сингоний* семь: *триклинная, моноклинная, ромбическая, тетрагональная, ромбоэдрическая, гексагональная, кубическая*. То есть, в природе существует 7 видов кристаллических решеток, обладающих сходными элементарными ячейками.

Самых же видов кристаллических решеток всего четыре: простая, базоцентрированная, объемцентрированная и гранецентрированная. Каждая из этих кристаллических решеток может быть представлена совокупностью двух или большего числа простых подрешеток, смещенных относительно друг друга. Отсюда, как это и показано выше, образуется в общей сложности 14 видов различных решеток, называемых решетками Бравэ.

Среди них, например: объемцентрированные (*ОЦК*) - характерны для железа и вольфрама; гранецентрированные (*ГЦК*) - характерны для меди, алюминия, свинца, никеля и т.д. [2].

1.1.2. Классификация кристаллов

по видам химической связи между атомами

Классификацию кристаллов можно провести не только по геометрическим признакам, но и по физической природе сил, удерживающих атомы в узлах кристаллической решетки, т.е. по видам химической связи между атомами [3,4].

Между атомами в общем случае могут действовать гравитационные, магнитные и электрические силы. Однако гравитационное и магнитное: взаимодействия между атомами весьма малы.

Так, потенциальная энергия гравитационного взаимодействия двух наиболее тяжелых атомов с атомным весом 250, расположенных на расстоянии 0,3 нм, равна $2,4 \cdot 10^{-32}$ эв.

Энергия магнитного взаимодействия двух элементарных магнитных диполей, находящихся также на расстоянии 0,3 нм, равна $7 \cdot 10^{-6}$ эв. Эта энергия

значительно больше гравитационной, но и она меньше средней энергии связи атомов в кристаллах, наблюдаемой экспериментально.

Электростатическая энергия взаимодействия двух элементарных электрических зарядов, находящихся на расстоянии $0,3 \text{ нм}$, равна 5 эв , что по порядку величины соответствует энергии химической связи, т.е. энергии связи валентных электронов в атомах. Следовательно, основную роль в образовании межатомных химических связей в кристаллах играют электрические силы, обусловленные валентными электронами.

По физической природе электрических сил, образующих кристаллическую структуру, различают четыре вида кристаллических решеток и соответственно четыре вида химических связей: ионная, ковалентная, металлическая и молекулярная. Такая классификация кристаллов в отличие от классификации по геометрическим признакам позволяет сделать некоторые выводы об их свойствах.

Рассмотрим основные свойства химических связей.

Ионная связь

Ионный вид связи в большинстве случаев образуется в результате соединения металлов с металлоидами (NaCl , KCl , CuCl_2 , CsCl и др.).

В качестве примера ионного кристалла рассмотрим NaCl . Натрий имеет на один валентный электрон больше, чем у инертного газа неона. У хлора в свою очередь на валентной орбите не хватает одного электрона по сравнению с инертным газом аргоном. Известно, что атомы инертных газов имеют наиболее устойчивые орбиты, то придает им химическую стойкость. При образовании NaCl атом натрия отдает единственный валентный электрон хлору, в результате чего оба атома приобретают устойчивые внешние электронные оболочки и становятся соответственно положительным и отрицательным ионами. Равновесное состояние решетки такого ионного кристалла обеспечивается уравниванием кулоновской силы притяжения разноименных ионов силой

отталкивания внутренних электронных оболочек, что соответствует минимальной потенциальной энергии системы.

Рассчитаем ориентировочно энергию ионной связи применительно к $NaCl$. Образование положительного иона натрия требует затраты энергии ионизации атома натрия, равной $5,1$ эв. Образование отрицательного иона хлора сопровождается выигрышем энергии сродства атома хлора к электрону $3,7$ эв. В целом процесс образования ионов требует затраты энергии, равной $1,4$ эв.

При электростатическом притяжении ионов выделяется значительное количество энергии, определяемое кулоновским взаимодействием.

Электростатическая энергия ионов в молекуле $NaCl$, расположенных на расстоянии $0,25$ нм (по спектроскопическим экспериментальным данным), равна $5,7$ эв. Следовательно, энергия образования ионной молекулы $NaCl$ из нейтральных атомов равна $4,3$ эв. Из приведенного расчета можно сделать важный вывод о том, что для ионных кристаллов характерна значительная величина энергии связи. Этим объясняются высокие прочность и температура плавления ионных соединений.

Многие ионные кристаллы прозрачны, диамагнитны и являются изоляторами. При высоких температурах с увеличением подвижности атомов возникает электропроводность ионного типа, сопровождающаяся переносом отдельных ионов в кристалле под действием электрического поля.

Каждый вид химической связи может быть охарактеризован степенью насыщения связи. Ионная связь является ненасыщенной, т. е. каждый ион стремится сблизиться с максимальным числом противоположно заряженных ионов.

Ковалентная связь

Рассмотрим упрощенную картину образования ковалентной связи на примере молекулы водорода [4]. В изолированном атоме водорода центр тяжести отрицательного заряда, образуемого вращающимся вокруг ядра

электроном, находится в центре атома и совпадает с центром тяжести ядра (рис. I.3).

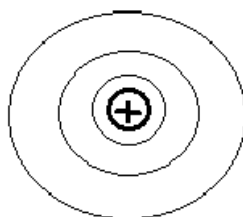


Рис. I.3. Распределение электронной плотности в основном состоянии атома водорода

При сближении атома водорода со вторым подобным атомом положение существенно изменяется (рис. I.4,а). Наличие второго атома нарушает равномерное вращение электрона и создает возмущение его движения.

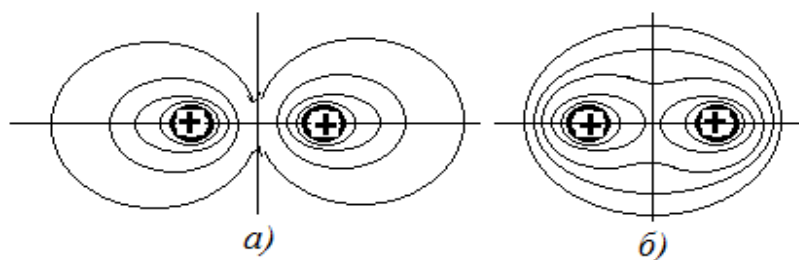


Рис. I.4. Распределение электронной плотности у двух взаимодействующих атомов водорода:

а) электронные спины параллельны (отталкивание);
б) электронные спины антипараллельны (молекула H_2)

При этих условиях уже нельзя считать, что один электрон вращается вокруг одного из ядер, а второй — вокруг другого. На определенном участке пути «чужое» ядро будет влиять на электрон сильнее, чем «собственное», в результате чего электрон начнет вращаться вокруг второго ядра. Далее наступит момент, когда преобладающими вновь станут силы собственного ядра и электрон начнет вращаться вокруг него. Такое явление будет, иметь место для каждого; из двух электронов, причем описанная картина усложняется тем, что между самими электронами будут действовать силы взаимного отталкивания (рис. I.4,б).

Из сказанного ясно, что при переходе от изолированных атомов к молекуле каждый электрон перестает принадлежать определенному ядру, а

обобществляется, совершая симметричные движения относительно обоих ядер. Характер его движения становится, значительно более сложным, чем для изолированного атома. Таким образом, в процессе образования молекулы, атомы как система, состоящая из ядра и электрона, перестают существовать. Электроны, которые принадлежали определенным атомам, теперь связаны с обоими ядрами. Молекула водорода уже не представляет собой простую совокупность двух атомов водорода, а является совершенно новой системой. При установлении ковалентной связи выделяется определенное количество энергии, равное энергии взаимодействия между атомами в системе.

Рассмотренный механизм образования ковалентной связи является весьма упрощенным. Более глубокой причиной возникновения ковалентной связи является обменное взаимодействие. Обменное взаимодействие проявляется в процессе обмена электронами между атомами и имеет квантово-механическую природу. Силы обменного взаимодействия называются *обменными силами*, а их энергия - *обменной энергией*. Признаком появления обменного взаимодействия является перекрытие электронных оболочек взаимодействующих атомов. В зависимости от ориентации спинов обобществляющихся электронов обменное взаимодействие проявляется в возникновении сил притяжения или отталкивания между сближающимися атомами. При антипараллельной ориентации спинов между атомами возникает сила притяжения, а при параллельной ориентации — сила отталкивания. Следовательно, молекула с ковалентной связью может быть образована лишь из атомов с противоположным направлением спинов валентных электронов.

Ковалентная связь имеет направленный характер: она образуется в том направлении, в котором расположена наибольшая часть электронного облака коллективизированных электронов.

Аналогичный по характеру механизм взаимодействия наблюдается не только у атомов водорода, но и у более сложных элементов, кристаллизующихся в решетке типа алмаза. При этом внутренние электроны остаются связанными с соответствующими ядрами и в образовании

ковалентной связи практически не принимают участия. В случае германия и кремния каждый атом с помощью своих валентных электронов участвует в обменном взаимодействии с четырьмя ближайшими соседями по решетке. Каждый атом при этом находится в центре тетраэдра, образованного ближайшими соседями. На *рис. 1.5* условно показана ковалентная связь в моноатомных полупроводниковых кристаллах. Каждые два соседних атома имеют два общих электрона, предающихся вокруг обоих ядер.

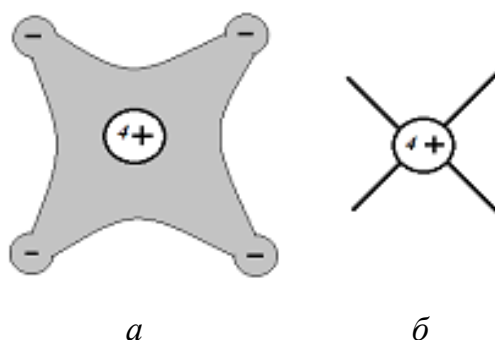


Рис. 1.5. Схематическое изображение электронного облака 2s- и 2p-электронов атома углерода (а) и четырёх его направленных валентностей (б)

Образование ковалентной связи сопровождается перераспределением электронной плотности. Электронная плотность значительно возрастает между ядрами. Характерной особенностью ковалентной связи является ее насыщенность. Число связей, которое может быть получено в молекуле, ограничено и определяется валентностью.

Молекулярная связь

Помимо описанных сил химической связи, в кристаллах существует *молекулярная связь* [3].

Молекулы многих веществ представляют собой *электрические диполи* и поэтому называются *полярными* молекулами. В природе имеется также много веществ, молекулы которых являются *неполярными*, но под воздействием электрического поля, например, поля *полярной* молекулы, у них возникает *индуцированный электрический момент*.

Поляризуемость неполярных молекул многих веществ достаточно велика. Электрический диполь может образоваться не только у молекул, но и у

атомов, у которых могут возникнуть мгновенные дипольные моменты, притягивающие или отталкивающие их друг от друга в зависимости от мгновенных положений электронов на орбитах. Эти мгновенные моменты возникают на расстояниях, больших тех, при которых происходит перекрытие электронных облаков и при которых ковалентная связь еще не возникла. Два таких атома представляют собой динамическую систему, обладающую меньшей энергией в том случае, когда возникающие мгновенные дипольные моменты притягивают атомы друг к другу.

Силы взаимодействия между диполями полярных молекул, молекул или атомов с индуцированным электрическим моментом называются силами Ван-дер-Ваальса. Силы Ван-дер-Ваальса, действующие между молекулами и атомами, обычно малы. Поэтому энергия связи в молекулярных кристаллах очень мала. Молекулярная связь наблюдается у многих органических и неорганических химических соединений и обуславливает образование твердого состояния инертных газов, водорода, кислорода, азота. Поскольку силы молекулярной связи слабы, то твердые тела, имеющие этот вид связи, неустойчивы, легколетучи и имеют низкие температуры плавления.

§ 1.2. Реальная структура металлов и дефекты кристаллических решеток

Дефекты (физические нарушения) твердых металлов обусловлены отклонениями от идеального регулярного расположения атомов в решетке кристалла. Идеальный кристалл можно представить себе только бесконечно большим. Реальный единичный кристалл (монокристалл) обладает свободной поверхностью, следовательно, имеет дефекты. В силу поверхностного натяжения решетка на поверхности кристалла и в прилегающей к ней зоне искажена; это увеличивает свободную энергию кристалла.

Границы между кристаллами в поликристаллическом теле представляют собой зоны с искаженной решеткой. Кристаллы в

поликристаллическом теле имеют криволинейные поверхности раздела (границы) неправильной формы, поэтому их в отличие от правильно ограненных кристаллов называют *кристаллитами* или *зернами* [1].

Реальный кристалл состоит из блоков (*субзерен*), ориентированных один по отношению к другому под малыми углами. Границы блоков или субграницы так же, как и *границы зерен*, являются *дефектами решетки*.

1.2.1. Точечные дефекты кристаллического строения металлов

Кроме указанных поверхностных дефектов кристаллического строения, имеются также точечные и линейные несовершенства в объеме кристалла.

Строение реальных металлов отличается от идеального представления наличием большого количества несовершенств, влияющих на их свойства. Различают точечные, линейные и поверхностные несовершенства кристаллического строения металлов [2, 5, 6]. К точечным несовершенствам относятся:

- вакансии, или свободные узлы кристаллической решётки;
- дислоцированные атомы, т.е. атомы, занимающие междоузлия;
- примесные атомы, т.е. атомы других элементов (*рис. 1.6*).

Точечными дефектами являются вакансии и атомы, смещенные в междоузлия (дислоцированные атомы), а также примесные атомы. Примесные атомы (химические нарушения) всегда присутствуют в металле. В некоторых случаях даже при очень малом их содержании, составляющем несколько тысячных долей процента, примеси весьма значительно влияют на свойства металла.

На *рис. 1.6* представлены основные виды точечных дефектов. Размеры таких дефектов не превышают несколько атомных диаметров. Наиболее распространенными из них являются *вакансии* – узлы кристаллической решетки, в которых отсутствуют атомы.

Вакансия – отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки, «дырки», которые образовались в результате различных причин. Образуется

при переходе атомов с поверхности в окружающую среду или из узлов решетки на поверхность (границы зерен, пустоты, трещины и т. д.), в результате пластической деформации, при бомбардировке тела атомами или частицами высоких энергий (облучение в циклотроне или нейтронной облучение в ядерном реакторе). Характерно следующее: образование вакансий может вызвать термическая активация атомов в решетке. В кристалле могут создаться условия, когда при соответствующей температуре кинетическая энергия некоторых атомов становится выше средней кинетической энергии. При перемещении таких атомов на поверхность кристалла, освободившее место может быть занято атомами из более глубоких слоев, при этом в кристалле и возникают вакансии (*дефект Шоттки*) [3,4].

Концентрация вакансий в значительной степени определяется температурой тела. Перемещаясь по кристаллу, одиночные вакансии могут встречаться. И объединяться в дивакансии. Скопление многих вакансий может привести к образованию пор и пустот.

Другим, наиболее распространенным дефектом кристаллической структуры, является наличие дислоцированных атомов и примесей (*рис. 1.6*). Механизм образования дислоцированных атомов похож на механизм образования вакансий. Отличие состоит в том, что такие атомы уходят с поверхности вглубь кристалла, попадая в междоузлие решетки. При достаточной кинетической энергии может наблюдаться переход атома внутри кристалла из узла решетки в междоузлие. При этом образуется *парный дефект* (вакансия и дислоцированный атом), называемый *дефектом Френкеля* [3,4].

Дислоцированный атом – это атом, вышедший из узла решетки и занявший место в междоузлии. Концентрация дислоцированных атомов значительно меньше, чем вакансий, так как для их образования требуются существенные затраты энергии. При этом на месте переместившегося атома образуется вакансия.

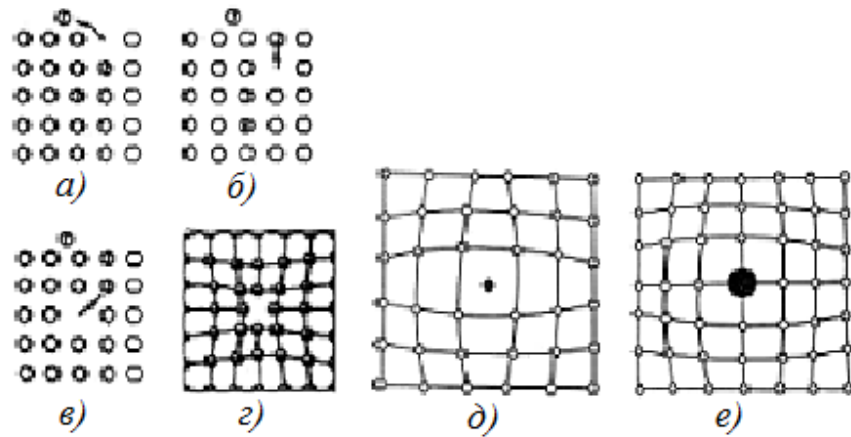


Рис. 1.6. Точечные несовершенства кристаллической решётки:
 а-г – вакансии; д – дислоцированные атомы; е – атомы примесей

Примесные атомы всегда присутствуют в металле, так как практически невозможно выплавить химически чистый металл. Они могут иметь размеры больше или меньше размеров основных атомов и располагаются в узлах решетки или междоузлиях.

Точечные дефекты вызывают незначительные искажения решетки, что может привести к изменению свойств тела (электропроводность, магнитные свойства), их наличие способствует процессам диффузии и протеканию фазовых превращений в твердом состоянии. При перемещении по материалу дефекты могут взаимодействовать.

Значительно большей протяжённостью, по сравнению с точечными дефектами, характеризуются линейные несовершенства кристаллической решетки и называются они - дислокациями.

1.2.2. Линейные дефекты кристаллической решетки

Основными линейными дефектами являются дислокации. Априорное представление о дислокациях впервые использовано в 1934 году Ороном и Тейлером при исследовании пластической деформации кристаллических материалов, для объяснения большой разницы между практической и теоретической прочностью металла.

Дислокация – это дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено

характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. Дислокации, образованные краем экстраплоскости (см. пунктирную линию на рис. I.7) называют краевыми.

Краевая дислокация представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край “лишней” полуплоскости. Неполная полуплоскость называется *экстраплоскостью*.

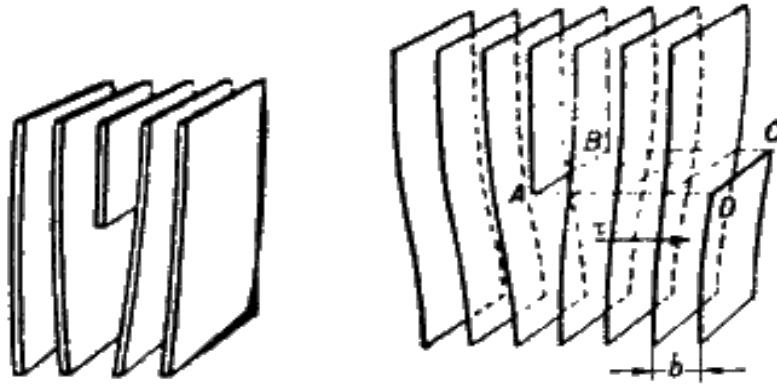


Рис. I.7. Краевая дислокация (а) и механизм ее образования (б)

Большинство *краевых дислокаций* образуются путем сдвигового механизма. Ее образование можно описать при помощи следующей операции. Надрезать кристалл по плоскости ABCD, сдвинуть нижнюю часть относительно верхней на один период решетки в направлении, перпендикулярном АВ, а затем вновь сблизить атомы на краях разреза внизу (рис. I.8).

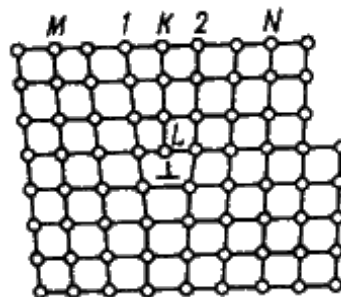


Рис. I.8. Искажения в кристаллической решетке при наличии краевой дислокации

Наибольшие искажения в расположении атомов в кристалле имеют место вблизи нижнего края экстраплоскости. Вправо и влево от края

экстраплоскости эти искажения малы (несколько периодов решетки), а вдоль края экстраплоскости искажения простираются через весь кристалл и могут быть очень велики (тысячи периодов решетки). Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то краевая дислокация – положительная, если в нижней, то – отрицательная. Дислокации одного знака отталкиваются, а противоположные притягиваются.

Другой тип дислокаций был описан Бюргерсом, и получил название *винтовых дислокаций*, образуемых в результате поворота одной части кристалла относительно другой (рис. 1.9).

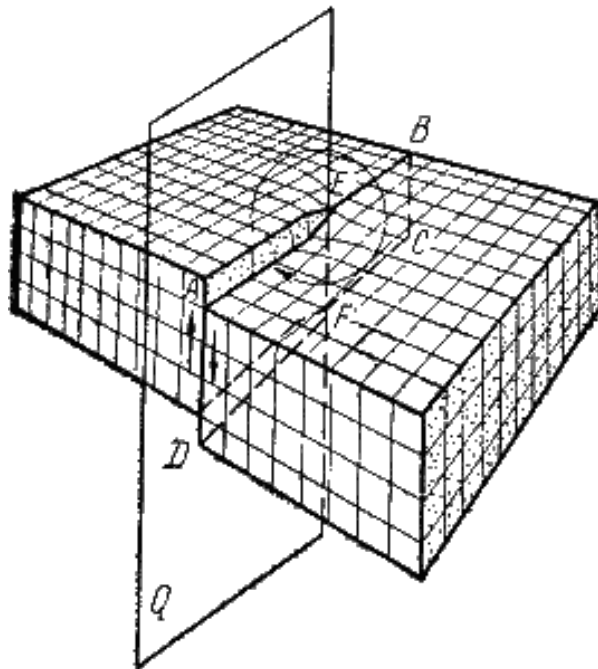


Рис. 1.9. Механизм образования винтовой дислокации

Винтовая дислокация получается при помощи частичного сдвига по плоскости Q вокруг линии EF . На поверхности кристалла образуется ступенька, проходящая от точки E до края кристалла. Такой частичный сдвиг нарушает параллельность атомных слоев, кристалл превращается в одну атомную плоскость, закрученную по винту в виде полого геликоида вокруг линии EF , которая представляет границу, отделяющую часть плоскости скольжения, где сдвиг уже произошел, от части, где сдвиг не начинался. Вдоль линии EF наблюдается макроскопический характер области

несовершенства, в других направлениях ее размеры составляют несколько периодов.

Если переход от верхних горизонтов к нижним осуществляется поворотом по часовой стрелке, то дислокация *правая*, а если поворотом против часовой стрелки – *левая*.

Винтовая дислокация не связана с какой-либо плоскостью скольжения, она может перемещаться по любой плоскости, проходящей через линию дислокации. Вакансии и дислоцированные атомы к винтовой дислокации не стекают.

В процессе кристаллизации атомы вещества, выпадающие из пара или раствора, легко присоединяются к ступеньке, что приводит к спиральному механизму роста кристалла.

Линии дислокаций не могут обрываться внутри кристалла, они должны либо быть замкнутыми, образуя петлю, либо разветвляться на несколько дислокаций, либо выходить на поверхность кристалла.

Дислокационная структура материала характеризуется *плотностью дислокаций* [7]. Плотность дислокаций ρ является важной характеристикой внутренней структуры металлов, оказывающей решающее влияние на их свойства. Под *плотностью дислокаций* понимают суммарную длину дислокаций, приходящуюся на единицу объема кристалла. Размерность плотности дислокаций: $\text{см}/\text{см}^3$, или см^{-2} . Зависимость прочности металла от плотности несовершенств кристаллической решетки показана на *рис. 1.10*. Определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью 1 см^2 , или как суммарная длина линий дислокаций в объеме 1 см^3

$$\rho = \frac{\sum l}{V}. \quad (1.2)$$

Плотность дислокаций изменяется в широких пределах и зависит от состояния материала. После тщательного отжига плотность дислокаций

составляет $10^1 \dots 10^3 \text{ см}^{-2}$, в кристаллах с сильно деформированной кристаллической решеткой плотность дислокаций достигает $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

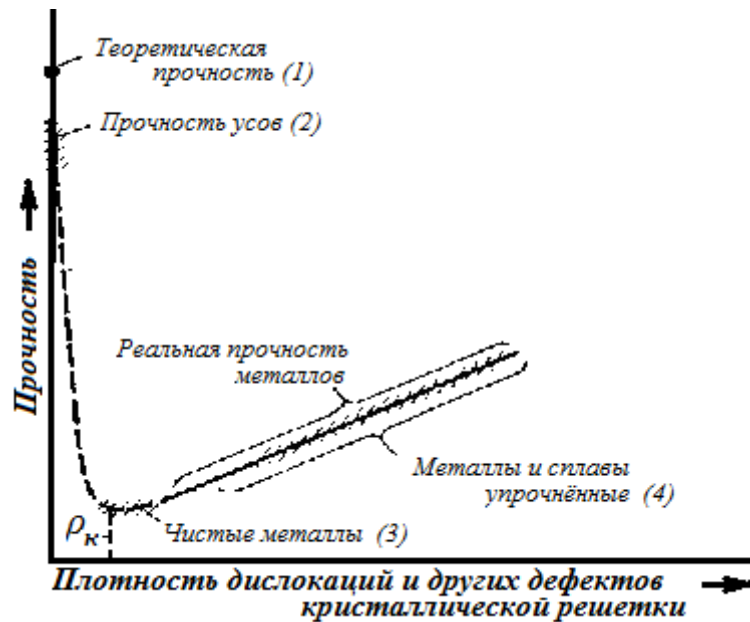


Рис. 1.10. Влияние плотности дислокаций на прочность

Именно плотность дислокаций в значительной мере определяет пластичность и прочность материалов. Минимальная прочность определяется критической плотностью дислокаций. Если плотность меньше значения ρ_k , то сопротивление деформированию резко возрастает, а прочность приближается к теоретической.

Современное материаловедение не ограничивается исследованием найденных бездефектных кристаллов, а ищет способы их получения искусственным путем. К настоящему времени уже разработаны методы выращивания монокристаллов практически всех металлов и многих сплавов. Именно в монокристаллическом состоянии выявились новые свойства привычных нам металлов — железа, вольфрама, никеля, молибдена. Оказалось, что чистые монокристаллы обладают хорошими физическими свойствами. Например, монокристаллы железа высокой чистоты приобретают высокую пластичность вплоть до температур жидкого гелия (-269°C) [8].

Особенно привлекают внимание так называемые «металлические усы» — тончайшие нитевидные кристаллы, всего в несколько микронов толщиной,

но с высокой прочностью. *Нитевидный кристалл* (*вискер* от англ. *whisker* – «ус») - монокристалл с очень высоким характеристическим отношением длины ($0,5 \text{ мм} \div 5 \text{ мм}$) к диаметру ($0,5 \div 50 \text{ мкм}$) около $100:1 \div 1000:1$. *Размерный эффект* при уменьшении диаметра приводит к практическому исчезновению дислокаций и идеальной поверхности, что приводит к увеличению прочности в сотни раз по сравнению с массивными (обычными) монокристаллами. Отсутствие дефектов также повышает тепло- и электропроводность, а для *ферромагнетиков* - также и коэрцитивную силу (до 40 кА/м у усов железа). Коэрцитивная сила их составляет 500 Э , в то время как у лучших магнитных сплавов 250 Э , а у чистого железа 1 Э .

Нитевидные кристаллы железа обладают и другими интересными свойствами. *Ферромагнетики* и *сегнетоэлектрики* в нитевидном кристалле обычно образуют монокристаллическую структуру. Рентгеноструктурный анализ помог разгадать причины чудесных свойств «усов» – это были бездефектные, «идеальные» монокристаллы чистого железа. Отсутствие дефектов в «усах» объяснялось особенностью их роста и малыми размерами. Они растут настолько быстро, что дефекты не успевают сформироваться.

В настоящее время созданы кристаллы без дефектов – нитевидные кристаллы длиной до 2 мм , толщиной $0,5 \dots 20 \text{ мкм}$ – «усы» с прочностью, близкой к теоретической: для железа - 13000 МПа , для меди - 30000 МПа .

Таблица I. 1

Некоторые значения прочности на растяжение,
(σ_0 в кгс/мм^2 ($1 \text{ кгс/мм}^2 = 10 \text{ Мн/м}^2$))

Материалы	σ_0	σ_0/E
Графит (нитевидный кристалл)		0,024
Сапфир (нитевидный кристалл)		0,028
Железо (нитевидный кристалл)		0,044
Тянущая проволока из высокоуглеродистой стали		0,02
Тянущая проволока из вольфрама		0,009
Стекловолокно		0,035
Мягкая сталь		0,003

Повышение прочности достигается созданием металла с бездефектной структурой, а также повышением плотности дислокаций, затрудняющим их движение. При упрочнении металлов увеличением плотности дислокаций, она не должна превышать значений $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В противном случае образуются трещины.

У поверхностных несовершенств протяжённость в двух измерениях значительно больше, чем в третьем. К важнейшим несовершенствам этого типа принадлежат границы между зёрнами в поликристаллических металлах. Вследствие неодинаковости пространственной ориентации решёток в соседних зёрнах происходит нарушение порядка расположения атомов, т.е. искажение кристаллической решётки на границе между зёрнами (*рис. 1.11*).

Поверхностные несовершенства имеются и внутри зёрен. Зёрна по своему кристаллическому строению не совсем однородны. Они состоят из отдельных субзёрен или блоков размером $10^{-2} \div 10^{-6} \text{ см}$.

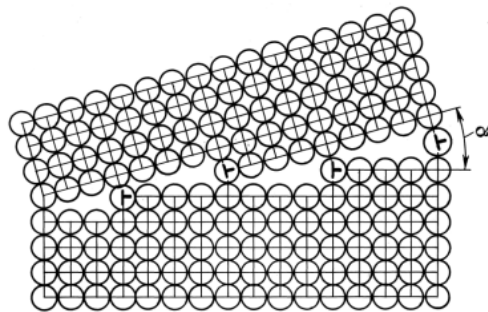


Рис. 1.11. Схема размещения атомов внутри и по границам зёрен

Чем больше угол разориентировки соседних блоков α , тем меньше расстояние между дислокациями в стенке. При углах разориентировки более $\sim 10^\circ$ указанная дислокационная модель неприменима для описания строения границы зерен, так как дислокации располагаются очень близко одна к другой и теряют свою индивидуальность (их ядра сливаются).

Поэтому к малоугловым или дислокационным относят межзеренные границы с углом разориентировки не более 10° .

Соседние субзерна внутри одного зерна обычно разориентированы на угол не более 1° . Поэтому все субзеренные (блочные) границы малоугловые.

Угол разориентировки кристаллических решёток соседних блоков α не превышает $1 \div 2^\circ$.

Блочное строение зёрен носит название мозаичной структуры или субструктуры. Схемы формирования мозаичной структуры приведена на *рис. 1.12*.

Поверхностные несовершенства кристаллической решётки в виде границ зёрен и блоков тормозят перемещение дислокаций и, тем самым, повышают прочность металла. Поэтому мелкозернистые металлы и металлы с хорошо развитой мозаичной структурой, отличающиеся большой протяжённостью границ, при прочих равных условиях более прочны, чем крупнозернистые металлы с грубой мозаичной структурой.

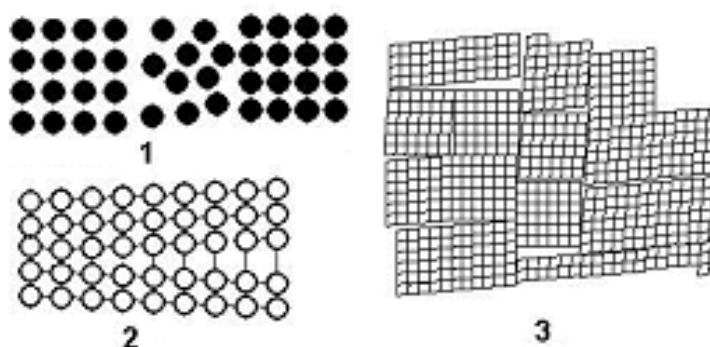


Рис. 1.12. Схемы формирования мозаичной структуры металлов

1.2.3. Анизотропия кристаллов

Одним из проявлений кристаллического строения металлов является анизотропия, под которой понимается неодинаковость свойств кристаллов в различных направлениях.

Различие свойств может быть очень большим. Например, у кристалла цинка коэффициент линейного расширения в двух взаимно перпендикулярных направлениях различается в четыре раза.

Прочность кристалла железа в двух взаимно перпендикулярных направлениях различается более, чем в два раза. Зависимость от направлений в кристаллической решётке присуща и химическим свойствам металлов.

Анизотропия кристаллов объясняется неодинаковой плотностью упаковки атомов в различных плоскостях и направлениях кристаллической решётки. Например, в ячейке ОЦК – решётки на каждую грань приходится один атом (поскольку каждый из четырёх атомов, расположенных в вершинах грани, принадлежит четырём аналогичным граням соседних ячеек). На диагональную же плоскость приходится два атома. Следовательно, в диагональной плоскости плотность упаковки атомов больше, чем в плоскости, совпадающей с гранью куба.

В ячейке ГЦК – решётки на каждую грань приходится два атома (поскольку каждый из четырёх атомов, расположенных в вершинах грани, принадлежит четырём аналогичным граням соседних ячеек и один атом принадлежит каждой грани отдельно), а на диагональную же плоскость приходится один атом (см. *рис. 1.13*).



Рис. 1.13. Схема размещения атомов в плоскостях ГЦК решётки:
- шесть плоскостей, совпадающих с гранями куба; и одна из возможных диагональных плоскостей, выделена штриховкой.

В кристаллическом теле атомы образуют правильно повторяющиеся конфигурации (решетки), но в разных направлениях плотность атомов в этих конфигурациях различна и условно можно представить, что кристалл пересекается плоскостями под разными углами с различным количеством атомов в каждой из этих плоскостей. Атомы этих плоскостей связаны друг с другом и между всеми атомными плоскостями также действуют силы притяжения. В гранецентрированной и объемно центрированной решетках

имеются три главные плоскости с наиболее плотной упаковкой атомов, которые обозначаются (100), (110), (111). Эти плоскости имеют минимальную поверхностную энергию (на *рис. I.14*).

Плоскости с наименьшей поверхностной энергией и плотной упаковкой атомов наиболее легко перемещаются относительно друг друга при деформации кристалла. Следовательно, требуется наименьшая затрата энергии для деформации кристалла в направлении указанных плоскостей, т. е. механические свойства в этих направлениях будут минимальными.

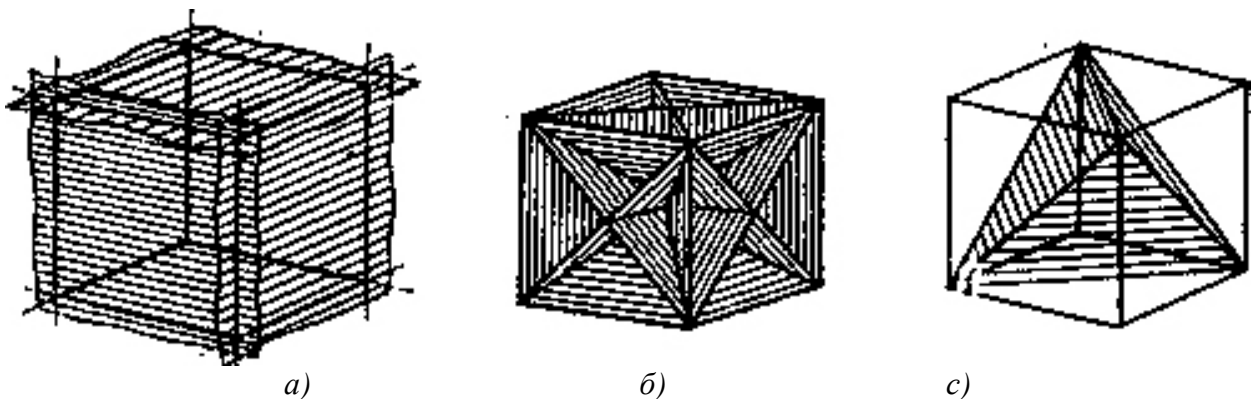


Рис. I.14. Условные плоскости в кубической решетке с наиболее плотной упаковкой атомов

а) - плоскости (100); б) - плоскости (110); в) - плоскости (111)

Также отличаются магнитная проницаемость, модули упругости, теплопроводность и ряд других свойств, измеряемых в разных направлениях кристалла (по разным кристаллографическим плоскостям).

Такая неодинаковость свойств кристалла в разных кристаллографических направлениях называется анизотропией. Следовательно, отдельный кристалл - тело анизотропное, т. е. имеет различные свойства в различных направлениях. Но на практике дело обычно имеют с поликристаллическими телами, состоящими из большого количества различно ориентированных друг к другу мелких (10^{-1} - 10^{-4} см) кристаллов, образующих кристаллиты или зерна. Поэтому анизотропия в поликристаллическом теле не имеет ярко выраженного характера и свойства как бы усредняются во всех направлениях благодаря различной ориентации мелких кристаллов. В этом случае поликристаллическое тело становится

изотропным подобно аморфным телам и приобретает одинаковые свойства во всех направлениях.

Анизотропия свойственна одиночным кристаллам или, так называемым, монокристаллам. Большинство же промышленных металлов имеет поликристаллическое строение, т.е. состоит из множества кристаллитов или зёрен, кристаллическая решётка которых произвольно ориентирована в пространстве. Каждое зерно в отдельности анизотропно, но в целом, из-за большого числа зёрен, свойства данного поликристаллического металла получаются усреднёнными в любом направлении.

1.2.4. Полиморфизм металлов

Как известно, среди 92 химических элементов, встречающихся в естественных условиях, подавляющее большинство является металлами. К неметаллам относят *H, B, C, N, O*; инертные газы (*He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn*); галогены (*F, Cl, Br, I, At*), а также *Si, P, S, As, Se* и др. Слева от ломаной линии в Периодической системе Д.И. Менделеева (рис. 1.15), находятся металлы, а справа расположены неметаллы.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																VIII	V
	A	I	II	III	IV	V	VI	VII	VI	VII	VI	VII	VI	VII	VI	VII	VIII	V
1	(H)																	
2	Li Литий	Be Бериллий	B Бор	C Углерод	N Азот	O Кислород	F Фтор	Ne Неон										
3	Na Натрий	Mg Магний	Al Алюминий	Si Кремний	P Фосфор	S Сера	Cl Хлор	Ar Аргон										
4	K Калий	Ca Кальций	Sc Скандий	Ti Титан	V Ванадий	Cr Хром	Mn Марганец	Fe Железо	Co Кобальт	Ni Никель								
5	Rb Рубидий	Sr Стронций	Y Иттрий	Zr Цирконий	Nb Нобий	Mo Молибден	Tc Технеций	Ru Рутений	Rh Родий	Pd Палладий								
6	Cs Цезий	Ba Барий	La* Лантан	Hf Гафний	Ta Тантал	W Вольфрам	Re Рений	Os Осмий	Ir Иридий	Pt Платина								
7	Fr Франций	Ra Радий	Ac** Актиний	Rf Резерфордий	Db Дубний	Sg Сгаборгий	Bh Борий	Hs Хассий	Mt Мейтнерий									
	R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄										
ЛАНТАНОИДЫ*	Ce Церий	Pr Прометий	Nd Неодим	Pm Прометий	Sm Самарий	Eu Европий	Gd Гадолиний	Tb Тербий	Dy Диспрозий	Ho Гольмий	Er Ербий	Tm Термий	Yb Йттербий	Lu Лютеций				
АКТИНОИДЫ**	Th Торий	Pa Протактиний	U Уран	Np Нептуний	Pu Плутоний	Am Америций	Cm Кюрий	Bk Берклий	Cf Калифорний	Es Эйнштейний	Fm Фермий	Md Менделеев	No Нобелий	Lr Лавренций				

Рис. 1.15. Периодическая система Д.И. Менделеева

Указанное деление является приближенным. Выделяют элементы, которые занимают промежуточное положение между металлами и неметаллами (*Si, Ge, As, Se, Te*).

В изолированном атоме все электроны распределены по энергетическим уровням. В порядке возрастания энергии эти уровни принято обозначать следующим образом: $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, (3d, 4s), 4p, (4d, 5s), 5p, (5d, 4f), 6s, 6p, (6d, 5f), 7s$. В данной последовательности происходит заполнение электронных уровней атома. Уровни, заключенные в скобки, почти одинаковы и в некоторых элементах могут менять свой порядок [9].

Среди металлов выделяют переходные металлы, расположенные в средней части Периодической системы Д.И. Менделеева. В этих металлах энергетические уровни заполняются непоследовательно.

Металлическая связь является ненаправленной связью. Поэтому для кристаллических структур металлов характерны высокое координационное число и большая компактность. Отсутствие сильных направленных связей и образование плотноупакованных структур определяют способность пластически деформироваться, изменяя форму без разрушения, т. е. металлические кристаллы более пластичные и менее твердые, чем ковалентные. Поэтому при изготовлении металлопродукции широко применяют методы пластического деформирования – ковку, прокат, волочение, штамповку.

Поскольку энергия металлической связи в металлических кристаллах несколько ниже, чем ковалентной, металлы в большинстве случаев по сравнению с ковалентными кристаллами имеют более низкие температуры плавления, модуль упругости, но более высокий температурный коэффициент линейного расширения.

Для большинства случаев с увеличением энергии связи растут температура плавления, модуль упругости, энергия активации самодиффузии, а коэффициент линейного расширения, наоборот, уменьшается.

В переходных металлах наряду с преобладающей металлической связью имеется ковалентная связь. Первая из них реализуется с помощью свободных s -электронов, а вторая – некомпесированными d - или f -электронами. Электропроводность этих металлов, также как и теплопроводность, ниже, чем у одновалентных. Они тверже и менее пластичны.

Необходимо отметить, что кристаллическое состояние твердого металла, как и всякого твердого тела, предопределяет собой зависимость его свойств от направления в кристалле. Такая зависимость называется анизотропией.

Чем симметричнее пространственная решетка металлов, тем меньше анизотропия. Она уменьшается также при переходе от направленной ковалентной связи к ненаправленной металлической. В металлах по этой причине, как правило, анизотропия свойств выражена не столь значительно, как в неметаллах. Тем не менее, в металлах она имеет большое практическое значение.

М.В. Ломоносов охарактеризовал металлы как «светлые тела, которые ковать можно», подчеркнув, таким образом, их металлический блеск и пластичность. В настоящее время мы добавим металлам ещё два важных свойства: высокую электро- и теплопроводность. Общность свойств металлов обусловлена особым типом связи между их атомами, которое определяется как *металлическая связь*.

В металлах в отличие от веществ с ионными и ковалентными связями валентные электроны не локализованы у соседних атомов, а принадлежат всему кристаллу. Внешние (валентные) электроны атомов металлов, в отличие от атомов неметаллических элементов, слабо связаны с ядром. Поэтому в металлах атомы легко теряют валентные электроны, превращаясь, таким образом, в положительно заряженные ионы. Освободившиеся электроны образуют так называемый электронный газ, который относительно свободно перемещается между ионами. Электростатическое

притяжение между отрицательно заряженным электронным газом и положительно заряженными ионами и представляет собой металлический тип связи. Поэтому при качественном описании металлической связи употребляются термины: «электронное облако», «электронный газ» или «электронная жидкость».

Металлическая связь, характерная для большинства металлов, представляет собой взаимодействие совокупности положительных ионов, погруженных в электронную «жидкость», состоящую из коллективизированных валентных электронов. Находящиеся между ядрами электроны притягивают их друг к другу. Наличие в металле валентных коллективизированных электронов, с одной стороны, обуславливает хорошую электропроводность металлов, а с другой — приводит к образованию металлической связи между ядрами.

Металлическая связь обычно образуется в тех случаях, когда число валентных электронов мало [10]. Чем меньше число валентных электронов, тем слабее они связаны с ядром. В этом случае энергетически выгодно образование металлической, а не какой-либо другой связи. С увеличением числа валентных электронов условия коллективизации ухудшаются, и связь перерастает в ковалентную. Металлическая связь является ненасыщенной. Здесь отсутствует ограничение в отношении числа атомов, которые могут быть объединены между собой коллективизированными электронами.

Описанные типы химической связи являются предельными случаями химического взаимодействия между атомами. В действительности, возможно большее число переходных, промежуточных и смешанных типов связи в зависимости от природы и различия электроотрицательности реагирующих атомов. Так, например, предполагается, что в бинарных полупроводниковых соединениях, кристаллизующихся в решетке типа цинковой обманки, возникает смешанная ковалентно-ионная связь [10].

Металлическая межуатомная p -связь, в отличие от других типов межуатомной связи, не имеет направленного характера. Электроны,

образующие электронный газ, не связаны с отдельными атомами, а принадлежат в одинаковой мере всем атомам. Вследствие этого электроны могут перемещаться внутри металла, не нарушая межуатомной связи.

Именно особенностями металлической межуатомной связи и можно объяснить характерные для металлов свойства. Так, высокая электропроводность металлов объясняется возможностью ускорения свободных электронов под воздействием электрического поля; высокая теплопроводность обусловлена участием свободных электронов в передаче тепловой энергии.

Способность металлов к пластической деформации обусловлена тем, что благодаря ненаправленному характеру связи приложение внешних сил приводит не к разрыву связи между атомами, а лишь к их взаимному относительному смещению (рис. I.16).

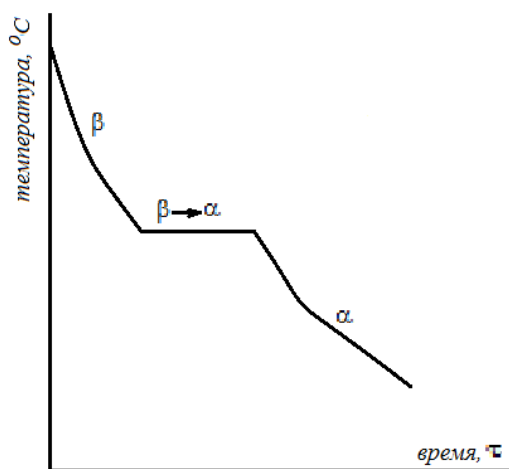


Рис. I.16. Кривая охлаждения при полиморфном превращении

При новом расположении атомов (ионов) характер связи между ними остаётся таким же, как и при старом.

Кристаллические модификации одного и того же металла обозначаются буквами греческого алфавита: α , β , γ , δ и т.д. Переход одной кристаллической модификации в другую совершается при постоянной температуре и сопровождается выделением тепла при охлаждении и поглощением тепла при нагревании. Поэтому на кривой «температура —

время» (рис. 1.16) полиморфному превращению соответствует горизонтальный участок.

Большое значение в технике имеет полиморфизм железа. На использовании этого явления основаны процессы термической обработки железных сплавов, изменяющих механические свойства сплавов в чрезвычайно широких пределах.

В частности, с точки зрения атомной физики [9], наличие у металлов характерного «металлического» блеска, отмечаемого Ломоносовым М.В., является следствием взаимодействия электромагнитных световых волн со свободными электронами.

Типы кристаллических решёток, в которых кристаллизуются важнейшие металлы, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Типы кристаллических решёток важнейших металлов

А. Металлы с неизменяющимся типом решётки	
Тип решётки	Металлы
ОЦК	Na, K, V, Nb, Cr, Mo, W,
ГЦК	Cu, Ag, Au, Al, Pb, Ni, Pt,
Гексагональная	Be, Mg, Zn, Cd
Б. Металлы с изменяющимся типом решётки	
Ca	ГЦК \leftarrow 450 0С \rightarrow ГП
Ti	ГП \leftarrow 882 0С \rightarrow ОЦК
Zr	ГП \leftarrow 862 0С \rightarrow ОЦК
Fe	ОЦК \leftarrow 9110С \rightarrow ГЦК \leftarrow 1392 0С \rightarrow ОЦК
Co	ГП \leftarrow 477 0С \rightarrow ГЦК

Общность кристаллического строения металлов обуславливает и общность некоторых свойств. В частности, металлы, кристаллизующиеся в гексагональной и ОЦК – решётках, имеют значительно большую склонность к хрупким разрушениям, чем металлы, кристаллизующиеся в ГЦК – решётке.

Так, хром, вольфрам, молибден, ниобий (ОЦК – решётка), а также магний, цинк, кадмий (гексагональная решётка) являются в обычных условиях хрупкими или малопластичными металлами. Вместе с тем, алюминий, медь, никель, серебро, золото, платина, свинец (ГЦК – решётка) обладают весьма высокой пластичностью.

Некоторые металлы при различных температурах существуют в различных кристаллических формах (модификациях). Способность одного и того же металла образовывать несколько разных кристаллических структур называется *поллиморфизмом*.

Различные структурные модификации одного и того же металла называют еще аллотропическими модификациями, а такие превращения под воздействиями температуры или давления называют аллотропическими превращениями.

Полиморфизм распространен среди многих металлов и имеет важное значение для техники, так как оказывает влияние на поведение металлов и сплавов при их нагреве и охлаждении во время термической обработки и при эксплуатации деталей в машинах.

Полиморфные модификации, происходящие при самых низких температурах, обозначают символом α , при более высоких - символом β при еще более высоких - символом γ и т. д.

Полиморфизмом обладают железо, кобальт, титан олово, марганец, ванадий, стронций, кальций, цирконий и др.

Физическая суть *поллиморфного превращения* заключается в том, что кристаллическое вещество при разных температурах переходит в состояние с меньшим запасом свободной энергии. Например, полиморфное равновесие титана наблюдается при 880°C , а олова - при $13,2^{\circ}\text{C}$.

Переход металла из одной аллотропической модификации в другую сопровождается выделением теплоты при охлаждении металла и поглощением теплоты при его нагреве, а внешняя температура остается постоянной.

Полиморфные превращения сопряжены с изменением компактности кристаллической решетки и изменением объема вещества. Переход железа из α - в γ -модификацию при температуре примерно 910°C сопровождается изменением объема на 1,6%. Плотность γ -железа на 1,05% больше плотности α -железа, а удельный объем γ -железа соответственно меньше.

ГЛАВА II

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

§ II.1. Агрегатные состояния и основные закономерности процесса кристаллизации металлов

Металлы, как и любые вещества, могут находиться в четырёх агрегатных состояниях: твёрдом, жидком, газообразном, в виде плазмы.

Выше приведена характеристика металла, исходящая из того, что все атомы металла одинаковы и кристаллическая решетка не имеет дефектов. Однако, реальный металл не является однородным, и даже в самом чистом металле имеются химические примеси и структурные нарушения (дефекты). То есть, понятие «*чистый металл*» – это условное понятие. А на практике, всегда оговаривают степень чистоты металла. Чем «*чище*» металл, тем значительнее его свойства зависят от степени загрязнения и дефектов структуры.

Наличие в кристаллической решетке разнообразных дефектов приводит к неравномерному распределению примесей. Свойства технических металлов легко воспроизводятся в производственных условиях. Однако наличие разного вида дефектов большей частью связано с технологией получения металлического изделия.

Несмотря на то, что атомы в жидком металле расположены не совсем хаотично, как в газообразной фазе, но в их расположении нет и той правильности, характеризующей твердое (кристаллическое) тело.

В жидкости наблюдается тенденция к правильному расположению атомов. При сближении атомов происходит перераспределение зарядов, и силы притяжения начинают преобладать над силами отталкивания, так как одноименные заряды стремятся удалиться, а разноименные – сблизиться.

Поэтому атомы стремятся притянуться друг к другу и занять положение наиплотнейшей упаковки, которое нарушается в жидкостях их соударениями в процессе тепловых колебаний. Местами на мгновение возникают упорядоченные группы атомов (ближний порядок), которые тут же разрушаются.

Дальнейшее охлаждение жидкости ослабляет соударение атомов и силам притяжения удается упаковать их плотнейшим образом. Возникает дальний порядок – кристаллическое состояние. То есть, пространственные решетки образуются в металле в процессе затвердевания (кристаллизации) - при переходе из жидкого состояния в твердое. Металл уплотняется, запасенная в нем свободная энергия снижается, и согласно *«второму закону термодинамики»* он переходит в более устойчивое состояние.

Процесс гомогенной (самопроизвольной) кристаллизации состоит из двух элементарных процессов: зарождение центров кристаллизации (зародыши) и рост кристаллов из этих центров. Следует понимать, что в жидком металле происходит непрерывное движение атомов. По мере понижения температуры это движение замедляется, атомы начинают группироваться, образуя первичные кристаллы. За счет атомов жидкого металла происходит рост кристаллов. В начале рост кристаллов не встречает препятствий, поэтому растущие кристаллы ещё сохраняют правильную форму, различаясь лишь пространственной ориентировкой. В дальнейшем растущих кристаллов становится больше, а жидкого металла остается меньше. При столкновении кристаллов наблюдается прекращение их роста в месте соприкосновения. Дальнейший же рост кристаллов продолжается только в том направлении, в котором нет препятствий, рост замедляется.

Скорость всего процесса кристаллизации количественно определяется двумя величинами: скоростью зарождения центров кристаллизации и скоростью роста кристаллов. При теоретической температуре кристаллизации эти значения равны нулю, т.е. кристаллизация не протекает. С увеличением переохлаждения значения число центров и скорость роста

возрастают, достигают максимума и затем понижаются; при больших величинах переохлаждения практически падают до нуля.

Поэтому для быстрого зарождения большого числа мельчайших центров нужно переохлаждение большее, чем для быстрого роста уже имеющихся кристаллов.

Следовательно, при медленном охлаждении возникает малое переохлаждение, малое число центров, но наблюдается достаточно быстрый рост кристаллов, ведущий к образованию крупнозернистой структуры. При быстром охлаждении – большое переохлаждение и большое число центров, в следствии этого кристаллы растут медленно, и образуется мелкое зерно [1].

В реальных условиях на характер образующейся структуры существенно влияет количество имеющихся в расплаве центров кристаллизации. Источником образования зародышей могут служить всевозможные твердые частицы, например, неметаллические включения, оксиды, интерметаллидные соединения. В процессе кристаллизации атомы металла откладываются на поверхности примеси, как на кристаллическом зародыше. Такая кристаллизация называется несамопроизвольной или гетерогенной. Чем большее количество примесей содержится в металле, тем больше центров кристаллизации и мельче зерно. Для измельчения структуры металлов и сплавов на практике в жидкий металл перед разливкой вводят специальные добавки – *«модификаторы»*. Такая технологическая операция получила название *«модифицирование»*.

Следует иметь в виду, что возможность измельчения структуры значительно увеличивается при соблюдении размерного и структурного соответствия примесной фазы и основного металла. А это значит, что расхождение межатомных размеров не должно превышать 5-7%. Такие примеси, практически не изменяя химического состава сплава, вызывают при кристаллизации измельчение зерна и в итоге улучшение механических свойств.

При литье слитков в фасонных отливках модифицирование чаще проводят введением в расплав добавок, которые образуют тугоплавкие соединения, такие как нитриды и оксиды, кристаллизующиеся в первую очередь.

Кристаллы, образующиеся в процессе затвердевания металла, могут иметь различную форму в зависимости от скорости охлаждения, характера и количества примесей. Нередко в процессе кристаллизации образуются разветвленные (*древовидные*) кристаллы, получившие название *дендритов*.

II.3.1. Основные закономерности процесса кристаллизации металлов

Переход металла из твёрдого состояния в жидкое называется плавлением; обратный процесс называется кристаллизацией. Температура, при которой начинается процесс плавления, называется температурой плавления [2,3].

На *рис. II.1* изображена кривая охлаждения чистого металла.

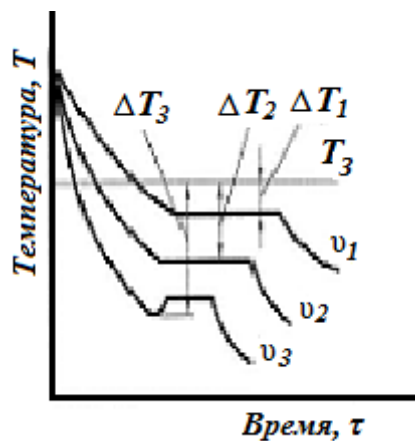


Рис. II.1. Кривые охлаждения чистого металла

ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 — степени переохлаждения при скоростях охлаждения v_1, v_2, v_3 соответственно ($v_1 < v_2 < v_3$)

При температуре затвердевания T_3 , которую можно условно считать равной температуре плавления, наблюдается остановка охлаждения, объясняемая выделением скрытой теплоты кристаллизации. Кривые охлаждения строятся при чрезвычайно медленном охлаждении.

В реальных условиях скорость охлаждения значительно больше, и процесс затвердевания происходит при более низкой температуре. Разница

между теоретической температурой затвердевания и реальной, зависящей от скорости охлаждения, называется степенью переохлаждения ΔT .

Процесс кристаллизации состоит из зарождения центров кристаллизации и их роста. Немецкий учёный Тамман установил взаимосвязь между скоростью зарождения центров кристаллизации ЧЦ, скоростью их роста СК и степенью переохлаждения (рис. II.2, II.3). Открытая закономерность имеет очень большое практическое значение. Пунктиром показано охлаждение с большей скоростью переохлаждения; ΔT_1 – переохлаждение.



Рис. II.2. Зависимость скорости зарождения ЧЦ и скорости роста кристаллов СК от величины переохлаждения ΔT

Рассмотрим влияние степени переохлаждения на скорость зарождения центров кристаллизации (рис. II.3).

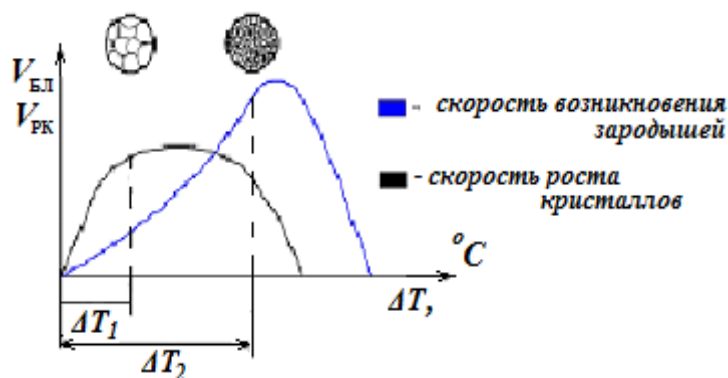


Рис. II.3. Влияние степени переохлаждения на величину зерна

Хорошо видно, что при переохлаждении ΔT_1 образуется 5 центров кристаллизации на единицу площади, при $\Delta T_2 - 10$, а значит, величина зерна металла уменьшается при увеличении степени переохлаждения (скорости охлаждения). Поэтому для получения в отливках более мелкого зерна необходимо охлаждать их с возможно большей скоростью. По различным причинам это не всегда целесообразно.

Вместе с тем, возможно уменьшить величину зерна в металле путём введения в расплав мелких труднорастворимых частиц, которые будут служить центрами кристаллизации. Такой способ получил название модифицирования [4].

§ II.2. Металлические сплавы

Применение чистых металлов в качестве конструкционных материалов нецелесообразно из-за низкой прочности. В связи с этим широкое применение нашли сплавы.

Под сплавами понимают сложные вещества, полученные сплавлением двух или нескольких элементов.

Элементы или химические соединения, образующие сплав, называют компонентами. Одним из компонентов металлического сплава может быть неметалл.

В жидком состоянии компоненты сплава обычно неограниченно растворимы друг в друге, образуя жидкие растворы.

В твёрдом состоянии в зависимости от взаимодействия компонентов могут образовываться разные типы сплавов: твёрдые растворы, механические смеси, химические соединения.

При отсутствии взаимодействия – образуются *механические смеси*. Механическая смесь двух компонентов *A* и *B* образуется когда они не способны к взаимному растворению в жидком состоянии и не вступают в химические реакции с образованием соединения. В этом случае сплав

состоит из кристаллов (*зёрен*) компонентов *A* и *B*, отчётливо выявляемых на изображении микроструктуры сплава (*рис. II.4*). И рентгенограмма покажет наличие в сплаве двух кристаллических решёток, соответствующих чистым металлам компонентов *A* и *B*.

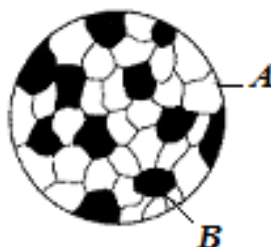


Рис. II.4. Схематическое изображение микроструктуры механической смеси

Механические свойства такого сплава зависят от относительного количественного соотношения компонентов, от размера и формы «зёрен», соответствующих промежуточным значениям свойств чистых компонентов. Например, *Pb–Sb*, *Al–Cu*.

На примере такого сплава удобно обсудить понятие «фаза» и «структура».

Фазой называется однородная часть сплава, характеризующаяся определённым составом, свойствами, кристаллической решёткой и отделённая от других частей сплава поверхностью раздела. Как видно из *рис. II.6*, сплавы рассматриваемого типа двухфазные. В них каждый компонент является фазой.

Под *структурой* понимают форму, размеры и характер взаимного расположения фаз в сплаве. *Фазовый состав и структура*, определяющие свойства сплава, зависят от состава и технологии его обработки. При взаимодействии компонентов образуются химические соединения. По структуре они представляют собой однородные твёрдые тела. Свойства химических соединений отличаются от свойств образующих их элементов. Они имеют постоянную температуру плавления.

Рентгеноструктурный анализ показывает различие кристаллических решёток химического соединения и исходных элементов. На *рисунке II.5* показана микроструктура химического соединения типа A_mB_n .

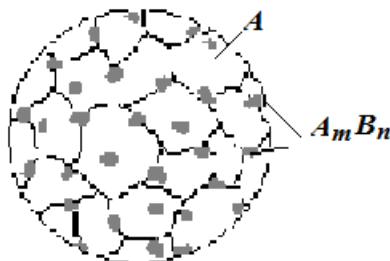


Рис. II.5. Схематическое изображение микроструктуры сплава с химическим соединением A_mB_n

Химические соединения характеризуются определённым соотношением атомов элементов, позволяющим выразить их состав стехиометрической пропорцией в виде простой формулы A_mB_n , где A и B – соответствующие элементы, а n и m – простые числа. При полной или частичной растворимости образуются твёрдые растворы [5]. Твёрдыми растворами называют фазы, которых один из компонентов (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решётку, а атомы других (растворяемых) компонентов располагаются в его решётке, искажая её. Химический анализ твёрдого раствора показывает два или более элементов, а металлографический и рентгеноструктурный – однородные зёрна и один тип решётки, как у металла-растворителя. Различают твёрдые растворы замещения, внедрения и механические смеси (*рис. II.6*).

Твёрдый раствор замещения образуется замещением части атомов растворителя в его кристаллической решетке атомами растворённого компонента (*рис. II.6,а*).

Твёрдый раствор внедрения образуется, если атомы одного компонента (B) находятся внутри кристаллической решетки другого компонента (A) (*рис. II.6,б*). Твёрдый раствор внедрения образуется путём внедрения атомов растворённого компонента в междоузлия (пустоты) кристаллической решётки. Образование твёрдых растворов внедрения, как правило,

сопровождается увеличением параметров кристаллической решётки и её искажением.

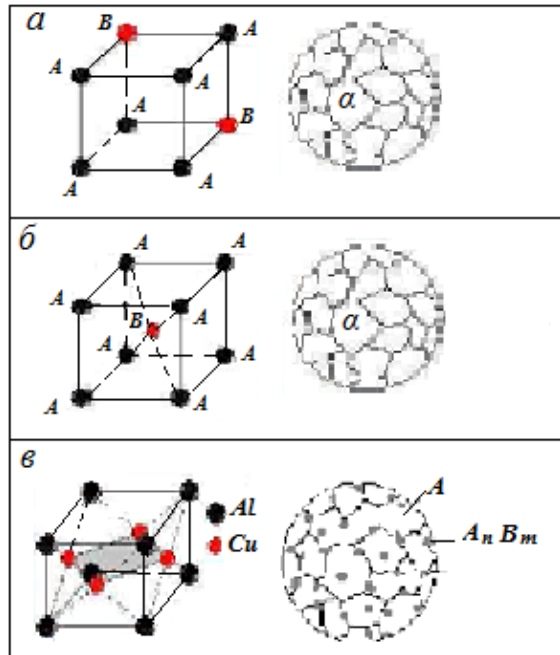


Рис. 11.6. Схематическое изображение кристаллических решёток твёрдых растворов: *а* – замещения; *б* – внедрения; *в* – микроструктура сталей на основе химических соединений

Механическая смесь возникает, если компоненты не могут растворяться друг в друге и не вступают в химическую реакцию (см. рис. 11.4).

Химические соединения, как было сказано выше, возникают, если компоненты могут вступать в химическую реакцию друг с другом и образовывать устойчивое сложное вещество со строго определённым соотношением между атомами одного и другого компонента. Например: интерметаллиды; карбиды - Me_xC_y ; нитриды Me_xN_y и т. п. При взаимодействии компонентов образуются

§ 11.3. Железо и его сплавы

11.3.1. Диаграммы состояния

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния сплавов в какой-либо системе. Она позволяет определить

температуры плавления и затвердевания, а также полиморфных превращений, фазовый состав и тип структуры любого сплава системы.

Диаграммы состояний строят путём термического анализа, с помощью которого получают кривые охлаждения сплавов исследуемой системы. По остановкам и перегибам на этих кривых, обусловленных тепловыми эффектами превращений, определяют температуры самих превращений.

Точки перегиба или остановки на кривых охлаждения называются критическими точками. Они соответствуют температурам, при которых в сплавах начинают протекать или заканчиваются какие-либо превращения.

Кривые охлаждения строят в условиях, близких к равновесным, то есть при очень малых скоростях охлаждения (при отсутствии переохлаждения).

Хотя фактически диаграммы состояния представляют собой теоретический вариант, на практике они используются для получения представлений о превращениях в сплавах при малых скоростях охлаждения или нагрева [5].

В двойных диаграммах состояния по вертикали откладывается температура, а по горизонтали – концентрация компонентов. Вид диаграммы состояния определяется характером взаимодействий между компонентами в жидком и твёрдом состояниях.

В рассматриваемых ниже случаях предполагается неограниченная растворимость компонентов в жидком состоянии.

Диаграмма состояний сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (*I рода*). Оба компонента (*A* и *B*) в жидком состоянии неограниченно растворимы друг в друге, а в твёрдом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений (*рис. II.7*), где *A* – температура плавления компонента *A*; *B* – температура плавления компонента *B*.

Верхняя линия – *ACB* является *линией ликвидус*, выше которой любой сплав находится в жидком состоянии. Линия *DCE* – *линия солидус* и одновременно линия эвтектического превращения. На линии *AC* при

охлаждении начинают выделяться кристаллы компонента A , а на линии BC – кристаллы компонента B .

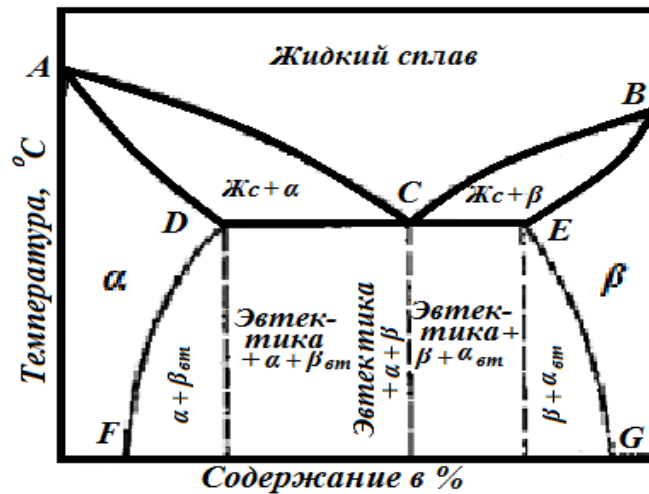


Рис. II.7. Диаграмма состояния сплавов, оба компонента которых ограничено растворимы в твёрдом, неограниченно растворимы в жидком состоянии и не образуют химических соединений

На линии DCE из жидкости, концентрации соответствующей точке C , одновременно выделяются кристаллы A и B , т.е. образуется эвтектика, что можно записать в виде уравнения: $Жс \rightarrow Э(A+B)$. У эвтектического сплава (соответствующего концентрации точки C) нет температурного интервала кристаллизации, как у доэвтектических (расположенных левее точки C) и заэвтектических (расположенных правее точки C) сплавов. Ниже линии солидус любой сплав находится в твёрдом состоянии.

Чтобы указать фазы на диаграмме состояния, можно поступить двумя способами.

Первый способ иллюстрируется рисунок II.7. Выше линии ликвидус ACB любой сплав находится в жидком состоянии. Эта область диаграммы обозначается буквой $Ж$ (жидкость). Ниже линии DCE -солидус любой сплав состоит из механической смеси компонентов α и β , так как они в твёрдом состоянии нерастворимы друг в друге (эта двухфазная область обозначена $\alpha+\beta$). В области ACD идёт процесс кристаллизации компонента α из жидкости. Эта область, как и предыдущая, является двухфазной и обозначена $Жс+\alpha$. В области BCE идёт процесс кристаллизации компонента β из жидкости. Область BCE тоже двухфазная и обозначена $Жс+\beta$.

Второй способ предусматривает определение фаз на диаграмме с помощью горизонтальных отрезков – изотерм. Такой отрезок проводится в области, где требуется определить фазовый состав, до пересечения с линиями диаграммы.

Концы отрезка укажут фазы, находящиеся в равновесии в данной области и при данной температуре. Так, в области ACD горизонтальный отрезок упирается в вертикальную линию чистого компонента α и в линию ликвидус AC (однофазную область Жс на диаграмме). Отсюда делается заключение, что в области ACD присутствуют две фазы – α и Жс . В областях ниже линии DCE изотерма упирается в линии, соответствующие чистым компонентам α и β . Следовательно, фазовый состав этой области $\alpha+\beta$.

II.3.2. Диаграмма состояния системы железо-углерод

Диаграмма состояния $Fe-C$ представляет сложную диаграмму с тремя химическими соединениями – Fe_3C , FeC , Fe_2C [5].

Практическое значение имеет только часть диаграммы $Fe-Fe_3C$ (рис. II.10), при рассмотрении которой химическое соединение Fe_3C принимаем условно за компонент.

Известно, что железо существует в трёх кристаллических модификациях: Fe_α (до $911^\circ C$), Fe_γ (от 911 до $1392^\circ C$), Fe_δ (от $1392^\circ C$ до температуры плавления). Типы кристаллических решеток железа указаны ранее (см. табл. II.2).

Механические свойства железа зависят от степени его чистоты и характеризуются следующими величинами (I – техническое, II – прямого восстановления, III - сверхчистое).

Таблица II.1

	I	II	III
Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	250	200	50
Предел текучести σ_T , МПа	120	100	25
Относительное удлинение δ , %	50	60	70
Относительное сужение ψ , %	85	90	100
Твёрдость HB, МПа	800	700	600

При 768°C железо испытывает магнитное превращение: выше этой температуры оно становится немагнитным. При дальнейшем рассмотрении диаграммы $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ это обстоятельство мы упоминать не будем. Железо со многими элементами образует твёрдые растворы: с металлами – растворы замещения, с углеродом, азотом, водородом и бором – твёрдые растворы внедрения.

Растворимость углерода в железе существенно зависит от того, в какой кристаллической модификации оно существует. В α – железе растворимость ничтожно мала (менее $0,02\%$) и в сто раз больше (до $2,14\%$) в γ – железе.

Твёрдый раствор углерода и других легирующих элементов в α – железе называется *ферритом*, в δ – железе – *дельта-ферритом*, а в γ – железе – *аустенитом*.

Цементит – это уже химическое соединение углерода с железом (карбид железа - Fe_3C). Состав *цементита* – 75% (атомных) Fe и 25% (атомных) C или $6,67\%$ (по массе) C , остальное – железо. *Цементит* имеет сложную ромбическую кристаллическую решётку. Характеризуется высокой твёрдостью ($\text{HB } 8000 \text{ МПа}$).

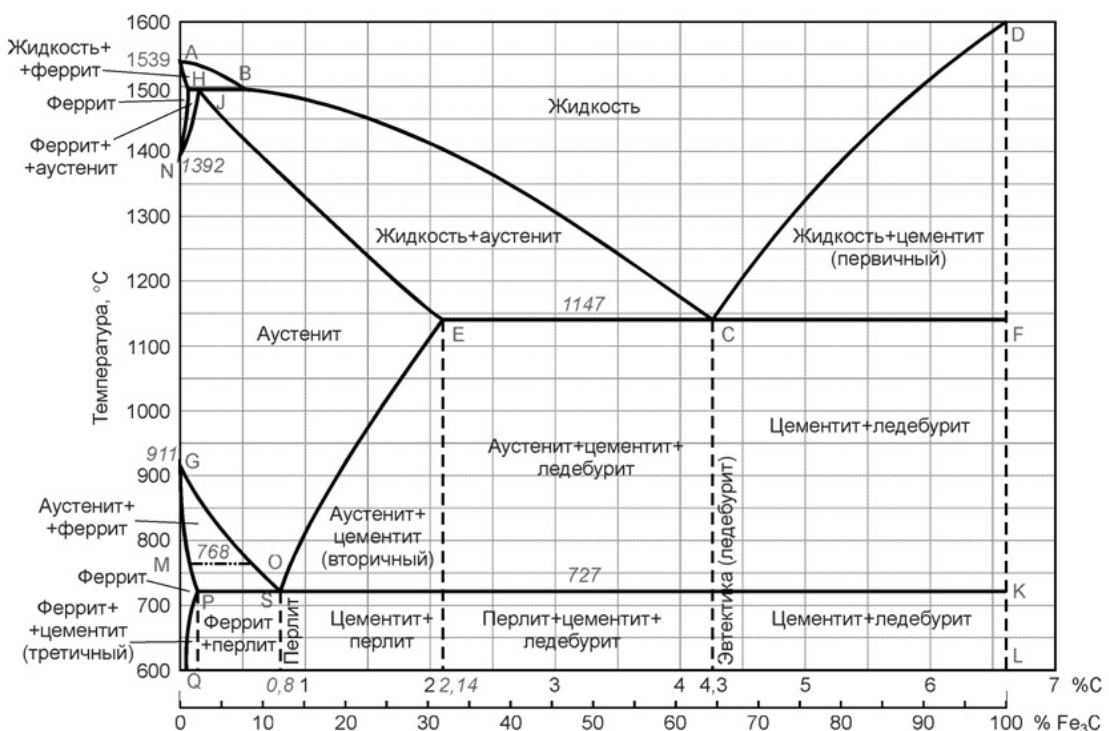


Рис. II.8. Диаграмма состояния Fe-C

Линия $ABCD$ является линией ликвидус системы; линия $AHJECF$ – линией солидус. Точка A соответствует температуре плавления железа, точка D – температуре плавления цементита. Точки N и G соответствуют температурам полиморфного превращения железа.

В системе существуют следующие фазы:

- жидкость (жидкий раствор углерода в железе), обозначается буквами **Ж** или **L** ;
- цементит Fe_3C – линия $DFKL$, обозначается химической формулой или буквой **Ц** ;
- феррит – представляет собой α – железо, которое в незначительном количестве растворяет углерод; обозначается буквой **Φ** ; область феррита расположена левее линии GPQ ;
- феррит–дельта – высокотемпературная модификация железа, обозначается **Φ_δ** ; область дельта – феррита расположена левее линии AHN ;
- аустенит – твёрдый раствор углерода в γ – железе; область аустенита на диаграмме – $NJESG$; обозначается буквой **A** .

Три горизонтальные линии диаграммы (HJB , ECF и PSK) соответствуют сосуществованию трёх фаз и указывают на протекание трёх нонвариантных реакций.

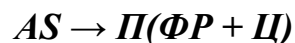
При 1499°C (линия HJB) протекает перитектическая реакция, в результате которой образуется аустенит:



При 1147°C протекает эвтектическая реакция, в результате которой образуется ледебурит (**L**) - эвтектическая смесь аустенита и цементита:



При 727°C протекает эвтектоидная реакция, в результате которой образуется перлит (**П**) – эвтектоидная смесь феррита и цементита:



Значения координат точек на диаграмме железо – углерод приведены в табл. II.2.

Таблица II.2

Координаты точек диаграммы железо-цементит

Обозначение. точки	Температура, °C	Содержание углерода, %	Обозначение. точки	Температура, °C	Содержание углерода, %	Обозначение. точки	Температура, °C	Содержание углерода, %
<i>A</i>	1535	0	<i>D</i>	1250	6,67	<i>P</i>	727	0,02
<i>H</i>	1499	0,1	<i>E</i>	1147	2,14	<i>S</i>	727	0,8
<i>J</i>	1499	0,16	<i>C</i>	1147	4,3	<i>K</i>	727	6,67
<i>B</i>	1499	0,51	<i>F</i>	1147	6,67	<i>Q</i>	20	0,006
<i>N</i>	1392	0	<i>G</i>	911	0	<i>L</i>	20	6,67

Железоуглеродистые сплавы, в зависимости от содержания в них углерода, делятся на техническое железо (до 0,02% C), сталь (0,02 – 2,14% C), чугун (свыше 2,14% C).

Структура технического железа представляет собой феррит с включениями третичного цементита.

Непременной структурной составляющей стали в равновесном состоянии является перлит. Второй структурной составляющей может быть либо феррит (доэвтектоидная сталь), либо вторичный цементит (заэвтектоидная сталь). Содержание углерода в доэвтектоидной стали находится в пределах 0,02÷0,8%, в эвтектоидной – 0,8%, а в заэвтектоидной – 0,8÷2,14 %.

В процессе медленного охлаждения из расплавленного состояния железоуглеродистые сплавы претерпевают следующие превращения. Техническое железо. Кристаллизация начинается на линии *AB* и заканчивается на линии *AN* образованием δ – феррита. В интервале между линиями *NH* и *NJ* дельта – феррит Φ_δ превращается в аустенит. Ниже линии *GS* происходит превращение аустенита в феррит и заканчивается на линии *GP*. Если сплав расположен левее точки *Q* (сплав *I*), то феррит является его единственной структурной составляющей, если правее (сплав *II*), то ниже линии *PQ* из феррита выделяется третичный цементит, располагающийся в

основном по границам ферритных зёрен. Такое расположение третичного цементита вызывает снижение пластичности и вязкости технического железа.

Чтобы указать на этой диаграмме структурные составляющие, разделим все сплавы на доэвтектические (до концентрации точки C) и заэвтектические (за точкой C), как это сделано на рисунке и проведём вертикальные линии, соответствующие концентрациям выбранного сплава. Линии пересечения сплава с линиями диаграммы образуют характерные точки на диаграмме. Точки, находящиеся на линии ликвидус и солидус, будут критическими для выбранного сплава.

Теперь, построим кривую охлаждения в координатах «температура – время» и проследим за процессами структурообразования (*рис. II.9*).

- Идеальный случай – при охлаждении расплава индивидуального вещества температура в точке кристаллизации остаётся постоянной до тех пор, пока весь расплав не закристаллизуется.
- Возможен случай переохлаждения – если в переохлаждённой жидкости появляется кристаллик (зародыш), то сразу начинается процесс кристаллизации и за счёт выделяющегося тепла температура переохлаждённой жидкости повышается.

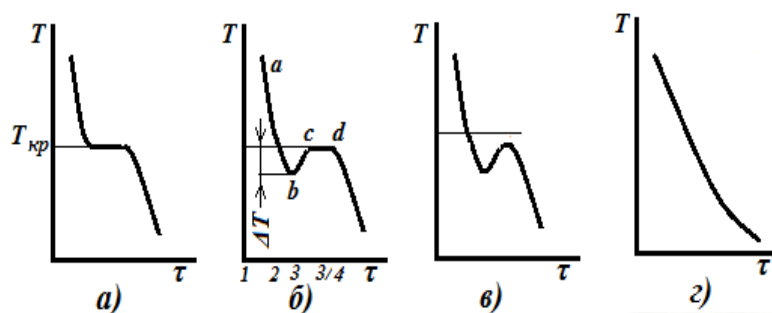


Рис. II.9. Кривая охлаждения

*а, б, в – кристаллизация без переохлаждения, при небольшом и значительном переохлаждении;
г – затвердевание вещества в аморфном состоянии*

Вместе с тем, различие между процессами плавления и затвердевания состоит в том, что кристаллическую фазу нельзя перегреть.

При построении кривой охлаждения воспользуемся правилом фаз Гиббса, которое устанавливает зависимость между числом фаз Φ , количеством компонентов K и числом степеней свободы системы C .

Использование правила фаз позволяет предсказать процессы, происходящие в сплавах при нагреве и охлаждении и определить число фаз в системе при данных условиях.

Правило фаз выражается уравнением:

$$C = K - \Phi + 2, \quad (II.1)$$

где C – число степеней свободы системы.

Под числом степеней свободы системы понимают число внешних (температура, давление) и внутренних (концентрация) факторов, которые можно изменять без изменения числа фаз, находящихся в равновесии. Для металлических сплавов внешним фактором является только температура.

Поэтому для металлических систем правило фаз записывается в виде:

$$C = K - \Phi + 1. \quad (II.2)$$

Рассмотрим кристаллизацию выбранного нами сплава.

Выше точки 2 сплав находится в однофазном (жидком) состоянии. В интервале температур 1-2 сплав охлаждается без изменения числа фаз с какой-то скоростью, которую характеризует наклон участка кривой охлаждения 1-2 к оси времени (рис. II.9,б). В точке 2 из жидкости начинают выделяться кристаллы компонента α .

Для того, чтобы определить ход кривой охлаждения в интервале 2÷3, применим правило фаз.

Число компонентов $K=2$ (α и β). Число фаз, находящихся в равновесии в интервале температур 2÷3 $\Phi=2$ (ЖС и β).

Следовательно, число степеней свободы в системе равно: $C=K-\Phi+1 = 2-2+1=1$.

Исходя из сказанного, можно сказать, что кристаллизация компонента β из жидкости будет происходить при изменяющейся температуре. Однако кривая охлаждения изменит свой ход из-за выделения скрытой теплоты

кристаллизации. Таким образом, на кривой охлаждения в точке 3 будет наблюдаться перегиб.

В процессе охлаждения в интервале температур 3-3' из жидкости будет выделяться и чистый компонент β .

Оставшаяся жидкость обедняется компонентом β и её состав при температуре эвтектического превращения будет соответствовать эвтектическому, т.е. точке C диаграммы на *рис. II.10*.

Таким образом, при температуре точки 3 в нашей системе в равновесии будут находиться и кристаллы компонента β и жидкость эвтектического состава, которая в интервале температур 3-3' будет претерпевать превращение в механическую смесь – эвтектику по реакции $ЖС \rightarrow Э(\alpha + \beta)$.

Чтобы определить дальнейший ход кривой охлаждения, применим правило фаз. Число компонентов $K=2$ (α и β). Число фаз, находящихся в равновесии интервале температур 3-3': $\Phi = 2 - 3 + 1 = 0$.

Из полученного следует, что превращение жидкости эвтектического состава в механическую смесь будет происходить при постоянной температуре ($C=0$, система нонвариантна). На кривой охлаждения (*рис. I.16*) при этом будет горизонтальная площадка 3-3', соответствующая продолжительности эвтектического превращения.

После завершения эвтектического превращения в точке 3' сплав будет находиться в твёрдом состоянии.

Интервал температур 3'-4 соответствует охлаждению сплава в твёрдом состоянии. Число компонентов $K=2$ (α и β), число фаз $\Phi = 2$ (α и β), число степеней свободы $C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$. Ход кривой охлаждения в интервале температур 3'-4 определяется скоростью охлаждения.

Процесс структурообразования выбранного сплава показан на *рис. II.10*. После охлаждения и кристаллизации в сплаве образуют следующие структурные составляющие:

- первичные кристаллы компонента β , выделившиеся из жидкости в интервале температур 2-3 (*рис. II.10,а*);

- эвтектика $\mathcal{E}(\alpha+\beta)$, образовавшаяся из жидкости эвтектического состава при температуре точки 3 (рис. II.10,б).

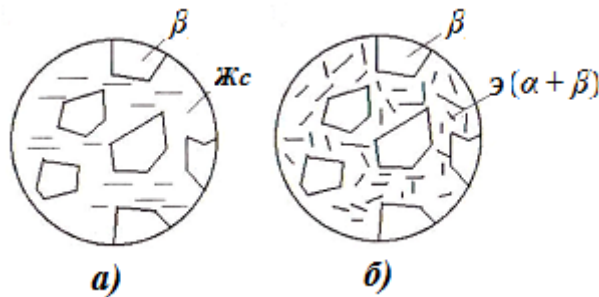


Рис. II.10. Схема процесса структурообразования сплава:
а – в интервале температур 3/-4; б – окончательная структура

Рассмотрим это на примерах сплавов сталей, образующих механические смеси (рис. II.11).

Доэвтектоидные стали, это сплавы с содержанием углерода от 0,025 до 0,8% *С* по массе; фазовые составляющие – α и Fe_3C ; структурные составляющие - феррит избыточный и перлит. На фото слева (рис. II.11,а) – сталь 20, справа – сталь У6. Структура доэвтектических сплавов будет состоять из первичных кристаллов компонента α и эвтектики $\mathcal{E}(\alpha+\beta)$. Количество эвтектики в обоих случаях будет увеличиваться с приближением сплава к эвтектическому составу. Количество и размеры первичных кристаллов α и β при этом будут уменьшаться.

Эвтектоидная сталь, содержит 0,8% *С* массы. Микроструктура – перлит. Перлит – пластинчатый эвтектоид, состоящий из чередующихся пластин цементита и феррита (рис. II.11,б).

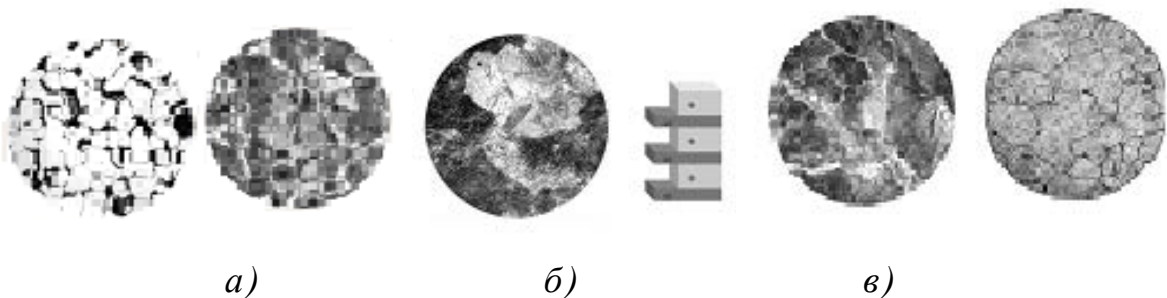


Рис. II.11. Окончательная микроструктура сплавов стали формируемых в интервале температур 2-3

Заэвтектоидные стали – сплавы с содержанием углерода от 0,8 до 2,06% *C* по массе; фазовые составляющие – α и Fe_3C ; структурные составляющие – цементит вторичный и перлит (на фото (рис. II.11,в) сталь У10 – слева после травления 3% раствором азотной кислоты в спирте, справа – пикратом натрия).

Очевидно, что в процессе кристаллизации изменяются как количество каждой фазы, так и их состав. В любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы, можно определить количество обеих фаз и их концентрацию. Для этого, как было показано выше, служит правило рычага, или правило отрезков.

Рассмотрим это на примере диаграммы состояния сплавов, образующих механические смеси (рис. II.12). Для конкретности возьмем сплав, содержащий 50% *B*, и определим для произвольно взятой точки *a* состав и количество фаз.

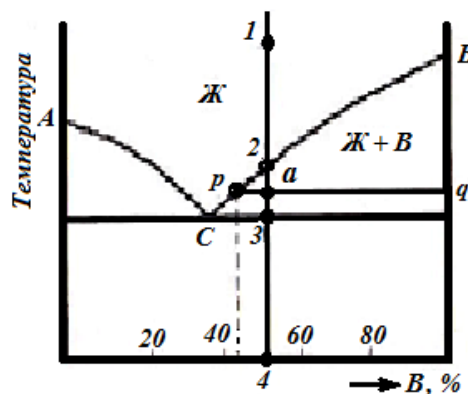


Рис. II.12. Определение состава фаз и их количества по правилу отрезков

Чтобы определить концентрации компонентов в фазах (состав фаз), через данную точку, характеризующую состояние сплава, проведём горизонтальную линию до пересечения с линиями диаграммы, ограничивающими данную область. Проекция точек пересечения на ось концентраций показывают составы фаз.

Следовательно, для нашего сплава при температуре точки *a* состав жидкой фазы будет соответствовать точке *p* диаграммы (а именно – 42% *B*), состав твёрдой фазы – точке *q* (а именно – 100% *B*).

Для того чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

В нашем случае количество каждой из фаз определяется по формулам:

$$QЖ = aq/pq \cdot 100 = \dots \quad (II.3)$$

$$QB = pa/pq \cdot 100 = \dots \quad (II.4)$$

Для того, чтобы определить количественное соотношение фаз, так же как и в предыдущем случае, проводят через заданную точку горизонтальную линию.

Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твёрдом состоянии (II рода)

Оба компонента неограниченно растворимы в жидком и твёрдом состояниях и не образуют химических соединений. В этом случае возможно существование только двух фаз: жидкого раствора - **Ж**, находящегося на диаграмме выше линии ликвидус, и твёрдого раствора – **α**, находящегося на диаграмме ниже линии - *солидус* (рис. II.12). Между линиями *ликвидус* – *солидус* и осуществляется кристаллизация твёрдого раствора из жидкости. В этой области и существуют в равновесии две фазы – **Ж** и **В**.

Примером сплавов с такими диаграммами состояния являются сплавы систем *Cu-Ni*, *Cu-Au*.

Диаграммы состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Оба компонента неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях и не образуют химических соединений.

Если два компонента неограниченно растворяются в жидком и твердом состояниях, то возможно существование только двух фаз: жидкого раствора

– **Ж**, находящегося на диаграмме выше *линии ликвидус*, и твердого раствора **В**, находящегося на диаграмме ниже *линии солидус*.

Между линиями ликвидус и солидус осуществляется кристаллизация твердого раствора из жидкости, и в этой области существуют в равновесии две фазы – **Ж** и **В** (см. *рис. II.8*).

*Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью
компонентов в твердом состоянии*

Данный вид диаграммы включает две рассмотренные ранее диаграммы (*рис. II.8* и *рис. II.12*). Более подробно она изображена на *рис. II.13*.

Ограниченную растворимость компонентов в твердом состоянии показывают линии *DQ* (предельная растворимость компонента **В** в кристаллической решетке компонента **А**) и *FG* (предельная растворимость компонента **А** в кристаллической решетке компонента **В**).

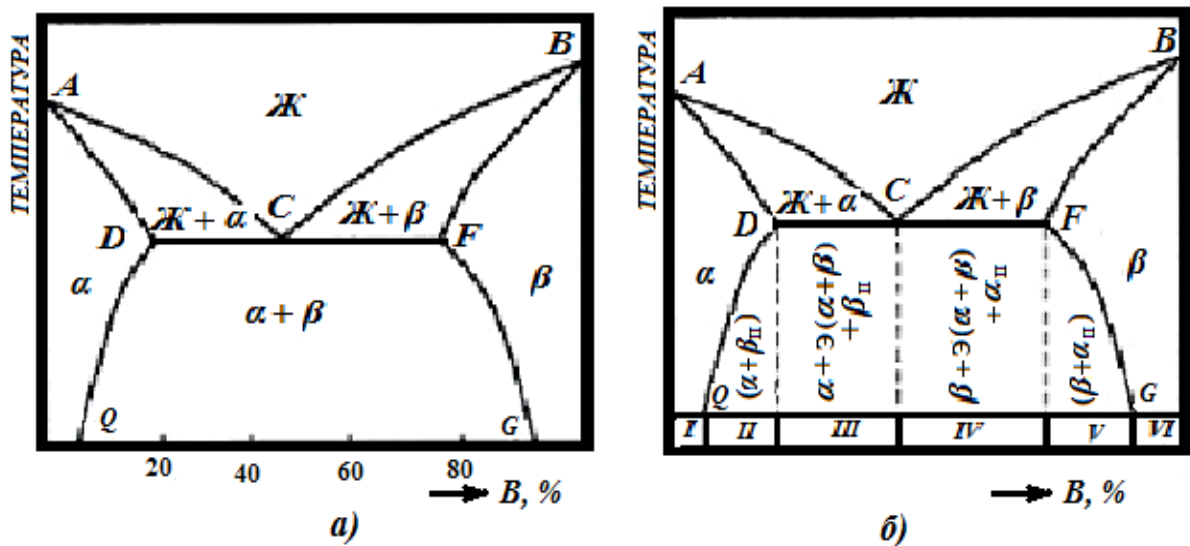


Рис. II.13. Диаграммы состояния для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а – фазовый состав; б – структурный состав):
 α – ограниченный твердый раствор компонента **В** в кристаллической решетке **А** (ограниченный твердый раствор на базе компонента **А**);
 β – ограниченный твердый раствор компонента **А** в кристаллической решетке **В** (ограниченный твердый раствор на базе компонента **В**).

Ниже указанных линий из ограниченных твердых растворов α и β выделяются вторичные фазы – α_{II} и β_{II} .

Для расшифровки данной диаграммы обозначим сначала на ней однофазные области:

- выше линии ликвидус ACB – жидкость \mathcal{J} ;
- в области, ограниченной линиями AD и DQ , – твердый раствор α ;
- в области, ограниченной линиями BF и FG , – твердый раствор β .

С помощью метода горизонтальных отрезков, описанного ранее, определим фазы в двухфазных областях.

- между линиями ликвидус AC и солидус DC – $\mathcal{J} + \alpha$;
- между линиями ликвидус CB и солидус CF – $\mathcal{J} + \beta$;
- в области $QDFG$ – $\beta + \alpha$.

На диаграмме с ограниченной растворимостью компонентов слева и справа (рис. II.13,б) можно отметить шесть характерных областей:

I и VI – структура состоит из твердых растворов α и β соответственно;

II и V – ниже линий предельной растворимости происходит выделение вторичных фаз:

- в области II из α – твердого раствора выделяется β_{II} ;
- в области V из β – твердого раствора выделяется α_{II} ;

Структура в областях II и V состоит из $(\alpha + \beta_{II})$ и $(\beta + \alpha_{II})$ соответственно, под эвтектической линией DF образуются структуры, содержащие эвтектику $(\alpha + \beta)$.

В доэвтектических сплавах сначала образуются избыточные кристаллы α – твердого раствора; в процессе кристаллизации состав жидкости изменяется в сторону обогащения компонентом B , и при температуре, соответствующей точке C , происходит эвтектическое превращение: $\mathcal{J} \rightarrow \mathcal{E}$ ($\alpha_D + \beta_F$). Таким образом, структура доэвтектических сплавов при температуре эвтектического превращения будет состоять из избыточных кристаллов α – твердого раствора и эвтектики (область III). Количество эвтектики возрастает с приближением состава сплава к эвтектическому.

Аналогичным образом можно проанализировать процесс структурообразования в заэвтектических сплавах. Структура заэвтектических сплавов при температуре эвтектического превращения будет состоять из избыточных кристаллов β – твердого раствора и эвтектики (область IV).

По мере охлаждения сплавов до комнатной температуры растворимость компонента A в β – твердом растворе и компонента B в α – твердом растворе будет снижаться в соответствии с линиями предельной растворимости DQ и GF , что вызовет выделение из твердых растворов вторичных фаз: из α – твердого раствора выделяется β_{II} , а из β твердого раствора выделяется α_{II} . Структура сплавов в области III будет $\alpha + \Xi (\alpha + \beta) + \beta_{II}$, а в области IV – $\beta + \Xi (\alpha + \beta) + \alpha_{II}$.

*Диаграмма состояния сплавов, образующих
устойчивые химические соединения*

Рассмотрим простейший случай таких диаграмм, когда оба компонента образуют одно устойчивое химическое соединение AB , причем и это соединение, и чистые компоненты не образуют в твердом состоянии растворов (нерастворимы друг в друге).

Химическое соединение устойчиво, поэтому оно может быть нагрето без разложения до своей температуры плавления. В этом случае данную диаграмму можно рассматривать как совокупность двух простых диаграмм и изучить каждую часть диаграммы отдельно.

II.3.3. Углеродистые стали

Кристаллизация *сталей* начинается на линии ABC и заканчивается на линии $ANJE$, причём при содержании углерода менее 0,51% при первичной кристаллизации образуется δ – феррит, превращающийся затем в аустенит по перитектической реакции. При содержании углерода свыше 0,51% аустенит образуется при непосредственной кристаллизации расплава. При дальнейшем охлаждении *доэвтектоидной* стали (сплав III, *рис. II.14*) ниже линии GS аустенит постепенно превращается в феррит, причём состав аустенита изменяется по линии GS в сторону точки S .

Углеродистыми сталями называются сплавы железа с углеродом, не содержащие *эвтектики* (ледебурита). Благодаря этому они обладают высокой пластичностью, особенно при нагреве, и хорошо деформируются.

Кроме железа и углерода в стали содержатся технологические добавки, остающиеся в ней после раскисления (Mn , Si) и вредные примеси (S , P), которые не удаётся полностью удалить при выплавке.

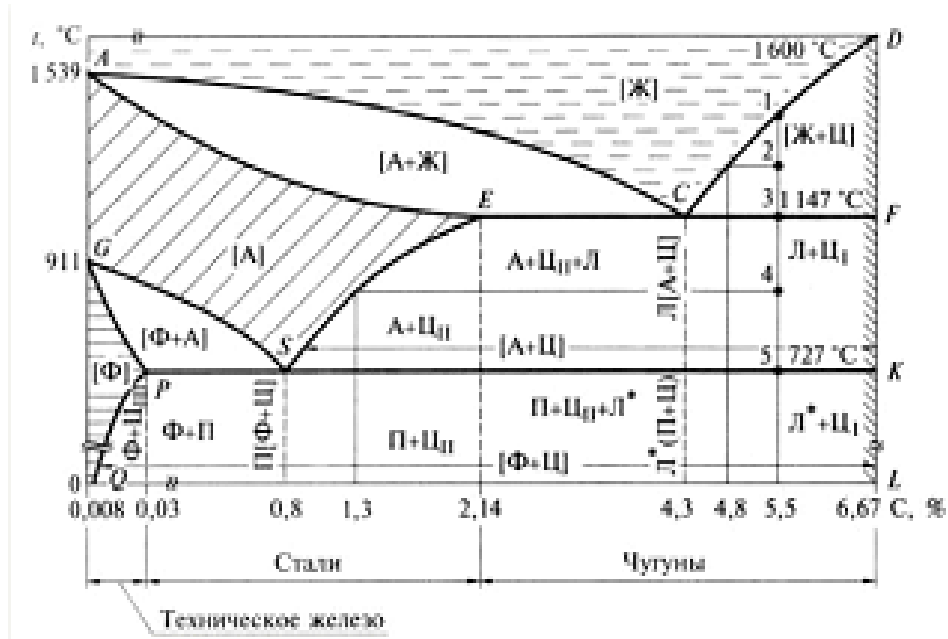


Рис. II.14. Диаграмма состояния железо-углерод:

Π – перлит; L , L^* – ледебурит; Ц_I , Ц_{II} , Ц_{III} – цементит первичный, вторичный, третичный; 1-5 – точки, характеризующие структурные превращения при охлаждении сплава, содержащего 5,5% C

Классификация углеродистых сталей. Углеродистые стали классифицируют по структуре в равновесном состоянии, способу раскисления, назначению и качеству.

По структуре в равновесном состоянии различают:

- доэвтектоидную сталь, содержащую до 0,8% C , структура которой состоит из феррита и перлита;
- эвтектоидную, содержащую около 0,8% C , структура которой состоит только из перлита;
- заэвтектоидную, содержащую 0,8–2,14% C , структура которой состоит из зёрен перлита, окаймлённых сплошной или прерывистой сеткой цементита.

По способу раскисления различают кипящие, полуспокойные и спокойные стали. При одинаковом содержании углерода они имеют близкие величины прочностных свойств и различаются значениями характеристик

пластичности. Содержание кремния в спокойной стали составляет 0,15–0,35%, в полуспокойной 0,05–0,15%, в кипящей до 0,05%.

Для раскисления кипящей стали кремний и алюминий не применяют, её раскисляют только марганцем. Кипящая сталь имеет резко выраженную химическую неоднородность в слитке. Её основным преимуществом является высокий (более 95%) выход годного.

Области высокотемпературного δ -феррита и низкотемпературного α -феррита

При температуре линии PSK ($727^{\circ}C$) состав оставшегося аустенита достигает точки S (0,8% C), и он превращается в *эвтектоид* – перлит. Таким образом, структура *доэвтектоидной* стали состоит из перлита и феррита.

Перлит имеет значительно более высокую прочность и меньшую пластичность, чем феррит. Поэтому чем больше углерода содержит сталь, т.е. чем выше в ней содержание перлитной составляющей, тем выше прочность и ниже её пластичность.

При охлаждении *эвтектоидной* стали (сплав IV) аустенит при температуре линии PSK целиком превращается в перлит. В *заэвтектоидной* стали (сплав V) ниже линии ES из аустенита выделяется вторичный цементит, располагающийся по границам аустенитных зёрен. По мере выделения вторичного цементита состав аустенита изменяется по линии ES в сторону точки S . При температуре линии PSK состав аустенита достигает точки S , и он превращается в перлит.

Таким образом, структура *заэвтектоидной* стали состоит из перлита и сетки вторичного цементита.

Благодаря низкому содержанию кремния и углерода кипящие стали хорошо штампуются в холодном состоянии. Из-за повышенной концентрации кислорода кипящие стали имеют сравнительно высокий порог хладноломкости и их не рекомендуют применять для изделий, предназначенных для эксплуатации в холодных климатических условиях.

У полуспокойной стали, раскисляемой марганцем и в ковше алюминием, выход годного составляет 90÷95%.

Спокойная сталь раскисляется кремнием, марганцем и алюминием. Выход годного слитков спокойной стали около 85%, но металл значительно более плотен и имеет более однородный химический состав.

По назначению углеродистые стали делят на конструкционные и инструментальные.

По качеству различают стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные; легированные стали могут быть особовысококачественными (табл. II.3).

При производстве последних применяют различные способы переплава слитков (вакуумно-индукционный, электрошлаковый и др.). Отрицательное влияние серы связано с тем, что она вызывает красноломкость стали. Сера нерастворима в железе и любое её количество образует сернистое соединение – сульфид железа FeS , который входит в состав *эвтектики*, образующейся при $988^{\circ}C$.

Таблица II.3

Классификация стали по качеству

Класс стали	Содержание вредных примесей, % не более	
	S	P
Обыкновенного качества	0,05	0,04
Качественная	0,04	0,035
Высококачественная	0,025	0,025
Особовысококачественная	0,015	0,025

Наличие легкоплавкой и хрупкой эвтектики, расположенной, как правило, по границам зёрен, делает сталь хрупкой при $800^{\circ}C$ и выше, т.е. в районе температур красного каления.

§ II.4. Влияние нагрева и скорости охлаждения углеродистой стали на ее структуру

Отрицательное влияние фосфора связано с тем, что, растворяясь в феррите, он резко повышает температуру перехода в хрупкое состояние (рис.

II.15), иначе говоря, вызывает хладноломкость стали. Поэтому при одинаковом содержании углерода качественные стали имеют более высокие пластичность и вязкость, особенно при низких температурах.

Углеродистые стали обыкновенного качества предназначены для изготовления неответственных строительных конструкций, крепёжных деталей, листов, труб, фланцев, кулачков и т.д. (ГОСТ 380-94).

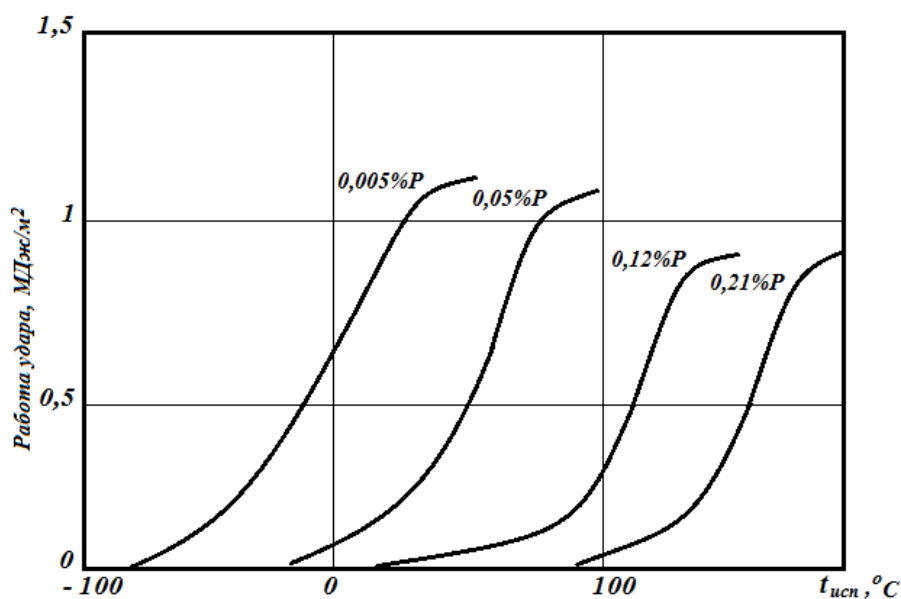


Рис. II.15. Влияние фосфора на хладноломкость стали (0,2% C; 1% Mn)

Углеродистые стали обыкновенного качества (табл. II.4) маркируются буквами Ст, что означает «сталь», и цифрами, обозначающими порядковый номер марки. Чем выше номер марки, тем больше содержание углерода и, соответственно, выше прочность и ниже пластичность. Для обозначения способа раскисления в марке добавляют индексы: кп — кипящая, пс — полуспокойная, сп — спокойная.

Марки сталей с повышенным содержанием марганца содержат букву Г. Во всех сталях, кроме Ст0, содержание серы и фосфора не должно превышать соответственно 0,05 и 0,04%. В стали Ст0 серы и фосфора не должно быть больше 0,06 и 0,07% соответственно.

Таблица II.4

Химический состав углеродистой стали обыкновенного качества

Марка стали	Содержание углерода, %	Содержание марганца, %	Содержание кремния, %
Ст0	Не более 0,23	-	-

Ст1кп	0,06-0,12	0,25-0,50	Не более 0,05
Ст1пс	0,06-0,12	0,25-0,50	0,05-0,15
Ст1сп	0,06-0,12	0,25-0,50	0,15-0,30
Ст2кп	0,09-0,15	0,25-0,50	Не более 0,05
Ст2пс	0,09-0,15	0,25-0,50	0,05-0,15
Ст2сп	0,09-0,15	0,25-0,50	0,15-0,30
Ст3кп	0,14-0,22	0,30-0,60	Не более 0,05
Ст3пс	0,14-0,22	0,40-0,65	0,05-0,15
Ст3сп	0,14-0,22	0,40-0,65	0,15-0,30
Ст3Гпс	0,14-0,22	0,80-1,10	Не более 0,15
Ст3Гсп	0,14-0,22	0,80-1,10	0,15-0,30
Ст4кп	0,18-0,27	0,40-0,70	Не более 0,05
Ст4пс	0,18-0,27	0,40-0,70	0,05-0,15
Ст4сп	0,18-0,27	0,40-0,70	0,15-0,30
Ст5пс	0,28-0,37	0,50-0,80	0,05-0,15
Ст5сп	0,28-0,37	0,50-0,80	0,15-0,30
Ст5Гпс	0,22-0,30	0,80-1,20	Не более 0,15
Ст6пс	0,38-0,49	0,50-0,80	0,05-0,15
Ст6сп	0,38-0,49	0,50-0,80	0,15-0,30

Качественная конструкционная углеродистая сталь поставляется по химическому составу и механическим свойствам (табл. II.5). Маркируют эти стали двузначными числами 05, 10, 15 ..., 60, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Таблица II.5

Химический состав и механические свойства углеродистых сталей
для отливок (ГОСТ 977-65 и 974-65)

Марка стали	Химический состав, %		Механические свойства				
	C	Mn	σ_B , кГ/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кГ/мм ²	δ , %	γ , Г/см ³	Твёрдость, НВ
15Л	0,12-0,20	0,35-0,75	40	20	24	5,0	109-135
20Л	0,17-0,25	0,35-0,75	42	22	22	5,0	116-144
25Л	0,22-0,30	0,35-0,75	45	24	19	4,0	124-153
30Л	0,27-0,35	0,35-0,75	48	26	17	3,5	131-157
35Л	0,32-0,40	0,50-0,90	50	28	15	3,5	137-166
40Л	0,37-0,45	0,50-0,90	53	30	14	3,0	146-173
45Л	0,42-0,50	0,50-0,90	55	32	12	3,0	153-179
50Л	0,47-0,55	0,50-0,90	58	34	11	2,5	159-190
55Л	0,52-0,60	0,50-0,90	60	35	10	2,5	170-199
70Л	0,65-0,75	0,50-0,90	-	-	-	-	280-380

* Негостированная сталь (технические условия заводов).

** Содержание серы и фосфора зависит от способа выплавки: содержащие Cr и Ni – до 0,30%; содержание Si – 0,20-0,42%.

*** Данные для нормализованной стали (с преобладающей толщиной стенки отливки до 100 мм).

Кроме указанных в таблице II.5, ГОСТ 1050-88 предусматривает следующие марки стали: 05кп, 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 11кп, 15кп, 15пс, 18кп, 20кп, 20пс, 58(55пп).

При обозначении кипящей или полуспокойной стали в конце марки указывается степень раскисленности: кп, пс. В случае спокойной стали степень раскисленности не указывается. Индекс «пп» - сталь пониженной прокаливаемости.

Углеродистая инструментальная сталь используется для изготовления ударного и режущего инструмента. По качеству эта сталь бывает качественной и высококачественной. Марки качественной стали: У7, У8, У10, У12, У13; высококачественной: У7А, У8А, У10А, У12А, У13А, где «У» означает углеродистая сталь, а числа - среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква «А» в конце маркировки указывает на то, что сталь высококачественная.

II.4.1. Отжиг и нормализация углеродистых сталей

Отжиг

Отжиг имеет целью улучшение структуры и свойств стали, подготовку ее структуры к окончательной термической обработке, смягчение стали для облегчения механической или пластической обработки и другие задачи.

Согласно классификации А.А. Бочвара отжиг бывает первого и второго рода.

Отжиг первого рода (нагрев ниже температур фазовых превращений) применяют для снятия наклепа и внутренних напряжений после холодной или полугорячей обработки давлением.

При *отжиге второго рода* сталь нагревают до температур выше фазовых превращений, выдерживают при этих температурах (чтобы успели произойти фазовые превращения) и в последующем медленно охлаждают (обычно вместе с печью). В процессе охлаждения аустенит превращается в ферритоцементитную смесь — перлит, выделяя избыточные фазы. Скорость охлаждения углеродистых сталей 50... 100 °С/ч, легированных сталей — 30...50 °С/ч. После отжига *доэвтектоидные* стали получают структуру

перлита и феррита; *эвтектоидные* — перлита; *заэвтектоидные* — перлита и цементита (вторичного).

На *рисунке II.16* приведены различные виды *отжига* и *отпуска* стали.

Диффузионный отжиг, или *гомогенизация*, заключается в нагреве стали до температур, близких, но не выше линии *солидус*, длительной выдержке при этой температуре ($10\div 15$ ч) и последующем медленном охлаждении до 600°C вместе с печью, затем на воздухе.

Этот вид отжига применяют для устранения неоднородности структуры и химического состава (в частности, литой структуры). После *диффузионного отжига* получается крупнозернистая, но однородная структура.

Для измельчения зерна после *диффузионного отжига* производят однократный или многократный *отпуск*, а иногда - *нормализацию* (см. ниже).

Полный отжиг заключается в нагреве стали до температуры, превышающей на $20\div 50^{\circ}\text{C}$ критическую точку, выдержке при этой температуре и последующем медленном охлаждении. При обычном отжиге стальные детали охлаждают медленно со скоростью $50\ldots 100^{\circ}\text{C/ч}$ до 500°C , а затем на воздухе.

К *заэвтектоидным* сталям полный отжиг не применяют, так как при медленном охлаждении этих сталей от температуры критической точки вторичный цементит выделяется по границам зерен в виде сетки и сталь приобретает повышенную хрупкость.

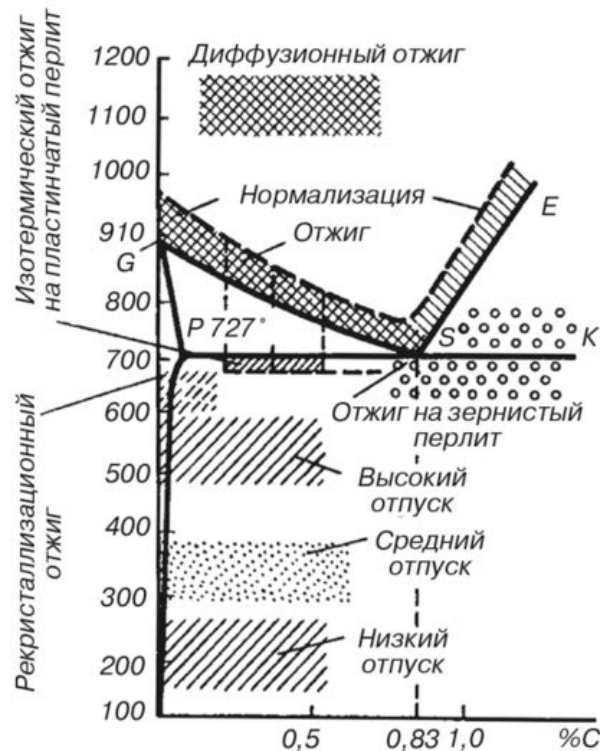


Рис. II.18. Диаграмма температурного режима для различных видов отжига и отпуска стали

Изотермический отжиг состоит из двух ступеней. Сначала сталь нагревают и выдерживают при температуре на $50\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше верхней критической точки (см. рис. II.16), затем быстро охлаждают до температуры, лежащей на $50\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже критической точки и выдерживают при этой температуре до полного распада аустенита на перлит, а затем охлаждают на воздухе. Изотермический отжиг требует гораздо меньшего времени, чем обычный.

После полного отжига снижается твердость, повышается пластичность и вязкость, улучшается обрабатываемость резанием. Структура стали подготовлена к конечной термической обработке (если таковая потребуется).

Неполный отжиг. При неполном отжиге сталь нагревают выше критической точки (см. рис. II.16), но ниже верхней критической точки с последующим медленным охлаждением. В этом случае происходит только частичная перекристаллизация структурных составляющих стали. В доэвтектоидных сталях перекристаллизации подвергается только перлит,

избыточный феррит остается без изменения. В *эвтектоидной* и *заэвтектоидной* сталях вторичный цементит переходит в аустенит.

Неполному отжигу подвергают стали, не требующие исправления структуры, т.е. измельчения зерен. При неполном отжиге снимаются внутренние напряжения, снижается твердость, повышается пластичность и вязкость, улучшается обрабатываемость резанием.

Сфероидизирующий отжиг применяют для *эвтектоидной* и *заэвтектоидной* сталей, т.е. в основном для инструментальных сталей. Цель такого отжига - замена в стали пластинчатого цементита зернистым. Процесс заключается в многократном повторении цикла медленного нагрева и охлаждения стали, имеющей структуру пластинчатого перлита, в области температур немного выше и несколько ниже критической точки. Невысокая температура нагрева стали позволяет сохранить большое число центров кристаллизации, способствующих образованию в перлите зернистого цементита.

Сфероидизацию называют также отжигом на зернистый перлит. Такой отжиг снижает твердость, повышает вязкость, улучшает обрабатываемость резанием.

Отжиг на крупное зерно производят для улучшения обработки резанием ферритоперлитных сталей. Такие стали нагревают значительно выше критической точки и очень медленно охлаждают в интервале критических температур, т.е. до точки ниже которой можно охлаждать с любой скоростью.

Светлый отжиг. За последние годы начали применять отжиг в печах с защитной атмосферой или с применением вакуума. Стальные детали после такого отжига имеют светлую и чистую поверхность (без окалины).

Рекристаллизационный отжиг применяют после холодной пластической деформации (прокатки, волочения, холодной штамповки и т.д.). Низкоуглеродистые стали нагревают до температуры 600...700°C.

После такого отжига вытянутые в результате деформации зерна становятся равноосными, снимается наклеп, понижается прочность и твердость, увеличивается пластичность и вязкость.

Дефекты отжига. Нагрев металла при отжиге до высоких температур или излишне длительная выдержка сопровождается получением крупнозернистой структуры и называется *перегревом*.

Перегрев стали может быть исправлен вторичным ее отжигом при соответствующем температурном режиме. Если температура нагрева при отжиге приблизится к температуре линии *солидус*, то может произойти пережог стали, сопровождающийся окислением металла по границам зерен.

Пережог стали исправить нельзя.

Нормализация

Нормализацию стали применяют для устранения внутренних напряжений, уменьшения твердости и получения мелкозернистой однородной структуры. Твердость и прочность стали получаются при этом несколько выше, чем после *отжига*.

Нормализация заключается в нагреве *доэвтектоидной* стали на $30\div 35^{\circ}\text{C}$ выше критической точки, а *эвтектоидной* и *заэвтектоидной* — непродолжительной выдержке этой температуре выше критической точки и последующем охлаждении на воздухе.

Структура стали после *нормализации* будет такой же, как и после *отжига*; некоторые высоколегированные стали после *нормализации* приобретают структуру *закалки*; структура *доэвтектоидной* стали после *нормализации* состоит из феррита и перлита, а у *заэвтектоидных* — устраняется *цементитная* сетка и образуется мелкая *ферритоцементитная* смесь (сорбит).

Для некоторых сталей *нормализация* является окончательной термической обработкой, т.е. они получают хорошее сочетание пластичности

и прочности. *Нормализация* — экономичный вид термической обработки, нашедший широкое применение в заводской практике.

II.4.2. Закалка и отпуск

Для повышения механической прочности и твердости и сохранения достаточной вязкости стали пользуются термической обработкой, состоящей из двух процессов: *закалки* и *отпуска*. *Закалка* и *отпуск* — основной вид окончательной термической обработки, придающий деталям и конструкциям необходимые эксплуатационные свойства.

Конструкционные стали после *закалки* и *отпуска* приобретают повышенную твердость, высокую прочность и вязкость. Инструментальные стали получают высокую твердость и износоустойчивость при достаточной вязкости.

Закалка заключается в нагреве стали на $30\div 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше температур фазовых превращений, выдержке при этой температуре и последующем быстром охлаждении. Температура нагрева зависит от содержания в стали углерода (рис. II.17).

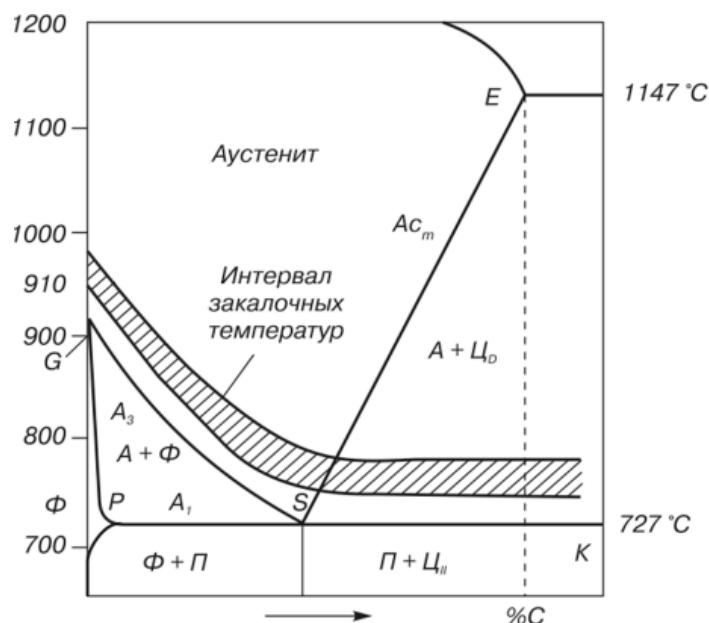


Рис. II.19. Температурный интервал нагрева углеродистых сталей для закалки

Вследствие высокой скорости охлаждения сталь приобретает структуры, отличающиеся от равновесных, соответствующих диаграмме

состояния системы «железо—углерод». Полученные при быстром охлаждении стали структуры называют метастабильными. Они представляют различные стадии превращения аустенита (*мартенсит, троостит, сорбит*).

Дозэвтектоидные стали, применяющиеся в основном в качестве конструкционных материалов в строительстве и машиностроении, нагревают под *закалку* на $30\div 50$ °C выше критической точки в результате чего перлит и избыточный феррит образуют однородный твердый раствор - аустенит. Последний при охлаждении со скоростью больше критической превращается в мелкоигольчатый мартенсит при небольшом количестве остаточного аустенита. Данный способ называется *полной закалкой*, после правильно проведенного отпуска он приводит к получению необходимой структуры стали с хорошими механическими свойствами.

Если перед закалкой нагреть *дозэвтектоидную* сталь до температуры, лежащей в интервале критических точек, то произойдет лишь частичная перекристаллизация стали; остается некоторое количество феррита, который в процессе закалки не претерпит изменений и тем самым снизит твердость стали. Такую закалку *дозэвтектоидной* стали называют *неполной* и ее применяют крайне редко; в общем случае она не позволяет получить максимально возможные прочностные свойства.

Эвтектоидные и *заэвтектоидные* стали нагревают перед *закалкой* на $30\div 50$ °C выше критической точки выдерживают при данной температуре и затем охлаждают со скоростью больше критической. Для этих сталей применяют *неполную закалку*. В структуре *эвтектоидной стали* после такой *закалки* будут мартенсит и остаточный аустенит, а в *заэвтектоидной стали* — мартенсит, вторичный цементит и остаточный аустенит.

Из *заэвтектоидных* сталей в основном изготавливают инструмент, от которого требуется высокая твердость и износоустойчивость, и присутствие вторичного цементита в виде мелких равномерно расположенных зернышек даже желательно.

II.4.3. Отпуск закаленных углеродистых сплавов

Все закаленные детали подвергают *отпуску*. При *отпуске* стали мартенсит *закалки* и остаточный аустенит распадаются, образуя более устойчивые структуры. Цель *отпуска* — уменьшение внутренних напряжений, снижение твердости и хрупкости, повышение пластичности.

Различают три вида отпуска:

- низкий - $150...200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (применяется для инструментов);
- средний - $300...400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (пружины, рессоры);
- высокий - $500...600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в большинстве случаев - для ответственных деталей машин и конструкций).

Закалка с высоким отпуском называется *улучшающей обработкой*. Улучшению подвергают конструкционные стали, содержащие $0,3...0,5\% \text{ C}$. Такие стали называют *улучшенными*.

Закаливаемостью называется способность стали существенно повышать твердость при *закалке*. *Закаливаемость* зависит в основном от содержания углерода и легирующих элементов в стали. Чем больше углерода, тем выше твердость образующегося при *полной закалке* мартенсита и тем лучше *закаливаемость* стали.

Прокаливаемостью называется способность стали принимать *закалку* на определенную глубину.

Неправильно проведенная *закалка* вызывает ряд дефектов в металле. К ним прежде всего относятся недостаточная твердость, пятна, повышенная хрупкость, деформация, коробление и трещины.

§ II.5. Чугуны

Чугунами называются сплавы железа с углеродом, содержащие более $2,14\% \text{ C}$. *Чугун* отличается от стали не только содержанием углерода. В структуре *чугуна* присутствует ледебурит или графит, поэтому *чугуны* хрупкие и не поддаются ковке, используются для получения литых изделий.

II.5.1. Классификация и свойства чугунов

В зависимости от формы выделения углерода различают следующие чугуны:

- *белый чугун*, в котором весь углерод находится в виде цементита; в изломе чугунов белого цвета, идет на переработку в сталь; называется *передельным*;
- *серый чугун*, в котором весь углерод в свободном состоянии имеет форму пластинчатого графита (*рис. II.18*);
- *высокопрочный чугун*, содержит графит шаровидной формы;
- *ковкий чугун*, в котором углерод имеет форму хлопьев.

Микроструктура чугуна состоит из металлической стальной основы и включений графита. От металлической основы *чугуна* зависит его твердость, она может состоять из перлита, феррита и перлита или из феррита. Графит имеет низкую прочность, места его залегания в структуре ослабляют металлическую *основу чугуна*.

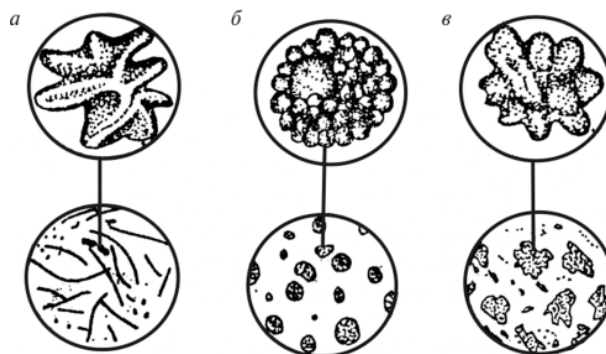


Рис. II.18. Структура чугуна с графитом различной формы:

а — пластинчатый графит в сером чугуне; *б* — шаровидный графит в высокопрочном чугуне; *в* — хлопьевидный графит в ковком чугуне чугуна резанием.

Серый чугун характеризуется низкими механическими свойствами при растяжении, хорошей жидкотекучестью, легко обрабатывается резанием, обладает хорошими антифрикционными свойствами, гасит вибрации и колебания. Для получения *серого чугуна* в *жидкий чугун* добавляют *кремний* ($1,2 \div 3,5\%$). При затвердевании *чугуна* кремний способствует выделению из жидкости *углерода* в виде графита. *Серый чугун* содержит графит

пластинчатой формы. Пластинки графита делают стружку ломкой, облегчая обработку.

Графит, являясь смазкой, впитывает смазку, что снижает коэффициент трения и повышает износостойкость, но разрыхляет металлическую основу и резко уменьшает ее прочность.

Чем больше графита и чем крупнее его включения, тем ниже механические свойства *чугуна*, так как пластинки графита, имея малую прочность, являются как бы готовыми трещинами в металлической основе. Измельчение графита увеличивает *прочность чугуна*, но пластическое удлинение при растяжении все равно мало. Для измельчения графита к *жидкому чугуну* добавляют модификаторы — *ферросилиций* и др. *Чугун* называется *модифицированным*, он более прочный и износостойкий.

Серые чугуны маркируют буквами СЧ и цифрами (ГОСТ 1412-85), показывающими предел прочности при испытаниях на растяжение: СЧ10, СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ21, СЧ24, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45. Например, СЧ10 — *серый чугун*, предел прочности при растяжении *100 МПа*.

Серые чугуны находят широкое применение в производстве дизельных и холодильных установок (блоки и головки цилиндров, картеры дизелей и компрессоров; корпуса масляных фильтров; поршневые кольца и др.); при производстве насосов систем отопления пассажирских вагонов, в электромашиностроении, для изготовления корпусов и крышек тормозных цилиндров вагонов. Для этих целей используют *чугуны* марок СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ25.

Высокопрочный чугун получают путем модифицирования *серого чугуна*, перед разливкой вводят в него *магний* в количестве до 0,5%. *Магний* увеличивает поверхностное натяжение графита с образованием пузырьков пара, в которые диффундирует *углерод*. После затвердевания графит приобретает округлую форму. Высокие механические свойства этого *чугуна* обусловлены тем, что шаровидный графит меньше разобщает металлическую

основу *чугуна*, благодаря чему *высокопрочный чугун* имеет высокую прочность при достаточной пластичности и вязкости.

Высокопрочный чугун обладает жаростойкостью, хорошими антифрикционными и литейными свойствами, достаточной износостойкостью.

Маркируют *высокопрочный чугун* буквами ВЧ и цифрой, характеризующей величину предела прочности при растяжении, например, ВЧ35, ВЧ40 (ГОСТ 7293-85).

Из *высокопрочных чугунов* изготавливают ответственные детали: зубчатые колеса, коленчатые валы дизелей тепловозов, ступицы, кронштейны, шатуны, поршневые кольца, картерные детали.

Ковкий чугун — это условное название мягкого и вязкого чугуна, изделия из него получают литьем, методы пластической деформации не применяют.

Ковкий чугун получают из белого путем *графитизирующего отжига*. После *отжига* свободный углерод имеет форму хлопьевидного графита.

Прочность ковкого чугуна в $2,5 \div 3$ раза больше прочности *серого*, он обладает высокой пластичностью по сравнению с *серым чугуном*. Его можно подвергать ударным нагрузкам.

Недостатком *ковкого чугуна* является его высокая стоимость из-за продолжительного дорогостоящего отжига ($25 \div 30$ ч). Согласно ГОСТ 1215-79 *ковкий чугун* обозначают буквами КЧ и двумя цифрами: первая обозначает предел прочности при растяжении, а вторая — относительное удлинение в процентах. Например, КЧ50-5.

Из *ковких чугунов* изготавливают головки и наконечники соединительных рукавов воздушной тормозной магистрали и крышки букс вагонов, ряд деталей электрических машин и др. Отливки из *ковкого чугуна* применяют в сельскохозяйственном машиностроении (шестерни, рычаги, звенья цепей, ступицы), вагоно- и судостроении (кронштейны, детали тормозной системы, подшипники), в электропромышленности.

В соответствии с реальными условиями кристаллизации в структуре чугунов могут быть разные составляющие в зависимости от того, какая часть углерода оказывается в структурно свободном состоянии. Это же определяет название чугунов: *белый, половинчатый, серый*.

Белый чугун — это тот, в котором весь углерод находится в связанном состоянии. *Белые чугуны* по структуре подразделяют на *доэвтектические*, имеющие структуру $\Pi + \text{Ц}_{\text{п}} + \text{Л}$, *эвтектические* со структурой Л , *заэвтектические* + Л . Высокая твердость и хрупкость *белого чугуна* обусловлены наличием в нем ледебурита.

Для изготовления деталей машин *белый чугун* не используют, поскольку он обладает высокой твердостью (НВ 450-550), хрупок и практически не поддается обработке режущим инструментом.

Половинчатый чугун - тот, в котором одна часть углерода находится в связанном состоянии ($C_{\text{связ}} > 0,8\%$), а другая - в свободном. В структуре *половинчатых чугунов* наряду с вторичным цементитом или цементитом ледебурита имеется графит. Структура *половинчатого чугуна* может быть $\Pi + \text{Ц}_{\text{н}} + \Gamma$ или $\Pi + \text{Л} + \Gamma$. Излом *половинчатого чугуна* частично белый (в местах залегания ледебурита), *частично серый* (в местах, где расположены включения графита).

Половинчатые чугуны, также как и *белые*, не используются для изготовления деталей машин.

Серый чугун — тот, в котором большая часть углерода или почти весь углерод находится в свободном состоянии, а в связанном состоянии может быть до 0,8% С. В структуре *серого чугуна* присутствует графит, количество, форма и распределение которого могут изменяться в широких пределах, а также цементит, но не в структурно свободном состоянии, а в составе *эвтектоида* - перлита; в структуре *серого чугуна* нет ледебурита или вторичного цементита.

Свое название «серый чугун» получил по цвету излома. В микроструктуре *серого чугуна* различают металлическую основу и включения графита, которые ее пронизывают. Графит в *сером чугуне* может быть разным по форме включений - пластинчатым, хлопьевидным и шаровидным. В *обычном сером чугуне* графит образуется в пластинчатой форме. Чугун, в котором графит имеет форму хлопьев, называют *ковким чугуном*. Чугун с графитом шаровидной формы называют *высокопрочным чугуном*.

Серый, ковкий и высокопрочный чугуны являются широко распространенными и дешевыми литейными конструкционными материалами. Свойства таких *чугунов* зависят как от структуры металлической основы, так и от характера графитных включений (их формы, размеров, количества).

Металлическая основа *чугуна* может состоять или из перлита (если количество связанного углерода в чугуне $C_{связ}$ составляет 0,8%), или из феррита + перлита (если $C_{связ} < 0,8\%$), или только из феррита ($C_{связ} < 0,03\%$).

В зависимости от структуры металлической основы *различают чугуны*: *перлитный*, имеющий структуру П + Г, *ферритно-перлитный* со структурой Ф + П + Г, *ферритный* со структурой Ф + Г.

Чугун с перлитной структурой обладает наибольшей твердостью, прочностью и износостойкостью. Наличие феррита в структуре металлической основы вызывает снижение прочностных характеристик и износостойкости. Наименьшая прочность - у ферритного *чугуна*. Твердость *чугуна* с различной структурой металлической основы имеет различные значения.

Пластичность чугунов мало зависит от структуры металлической основы.

Форма графитных включений мало влияет на *твердость чугуна*, но оказывает значительное влияние на прочность и пластические свойства, так как графит обладает низкими механическими свойствами.

Включения графита пластинчатой формы действуют как острые внутренние надрезы или трещины, ослабляющие металлическую основу и уменьшающие *прочность* и *пластичность чугуна*. Чем крупнее пластины графита и чем менее равномерно они распределены по объему, тем ниже *прочность чугуна* при растяжении. При сжатии свойства чугуна с пластинчатыми включениями графита остаются довольно высокими (разрушающая нагрузка при сжатии в $3 \div 5$ раз больше, чем при растяжении), близкими к свойствам стали с такими же составом и структурой, что и металлическая основа *чугуна*. Это свидетельствует о том, что включения графита практически не влияют на *прочность чугуна* при сжатии. Они также менее значительно, чем при растяжении, снижают *прочность чугуна* при изгибающем действии нагрузки.

Чем компактнее форма включений графита и чем меньше их количество, тем меньше они ослабляют металлическую основу, тем *выше прочность* и *пластичность чугуна* при одной и той же структуре металлической основы. Так, *чугун* с включениями графита шаровидной формы имеет значительно более высокую прочность при растяжении и изгибе, чем *чугун* с пластинчатыми графитными включениями (отсюда и название *чугуна* - *высокопрочный*).

Пластичность чугуна зависит от формы включений графита следующим образом:

Графит	Пластинчатый	Хлопьевидный	Шаровидный
$\delta, \%$	0,2-0,5	5-10	10-15

Включения графита также заметно понижают *модуль упругости чугуна*, значения которого оказываются значительно ниже, чем у *стали*.

Однако в определенных случаях наличие графита в структуре полезно и дает *чугуну* преимущества перед *сталью*: включения графита облегчают обрабатываемость *чугуна* резанием (ломкая стружка); благодаря смазывающему действию графита *чугун* обладает хорошими антифрикционными свойствами, т.е. хорошо работает на трение; *чугун* с

включениями графита обладает способностью быстро гасить вибрации, колебания; графит делает *чугун* практически нечувствительным к поверхностным надрезам и другим дополнительным дефектам на поверхности. Следует также отметить хорошие литейные свойства *чугуна*, дающие ему преимущество по сравнению со *сталью*.

Влияние скорости охлаждения и химического состава на структуру *чугуна*. *Скорость охлаждения* значительно влияет на *структуру чугуна*: при одном химическом составе в деталях разной толщины образуется неодинаковая структура.

Применяемые на практике *чугуны* кроме *железа* и *углерода* содержат другие элементы и являются сложными по химическому составу сплавами. Элементы, способствующие образованию (кристаллизации) графита, называются *графитизирующими*: *Al, Si, Ti, Cu* и др. *Углерод* и *кремний* являются *графитизирующими* элементами. Изменяя содержание *углерода* и *кремния*, можно получить *чугуны* с различной структурой.

Элементы, способствующие получению *углерода* в связанном состоянии в виде соединений (цементита или карбидов), называются *антиграфитизирующими*: *W, Mn, S, Cr* и др.

Обычные *серые чугуны* содержат в качестве основных элементов *железо*, *углерод* и *кремний*. По существу они представляют собой *Fe-C-Si* сплавы, в которых постоянными примесями являются *марганец*, *сера* и *фосфор*. В небольших количествах в обычных *серых чугунах* могут присутствовать *хром*, *никель* и *медь*, попадающие в них при выплавке из руды.

Обычно в производстве для получения заданной структуры регулируют содержание в *чугуне* *углерода*, *кремния* и *марганца*. В отливках большой толщины, охлаждающихся медленно, содержание *кремния* может быть меньше, чем в отливках тонкостенных, охлаждающихся ускоренно. В *серых чугунах* концентрация *кремния* находится в пределах $1,5 \div 3,5\%$.

Марганец затрудняет *графитизацию* и способствует увеличению связанного *углерода* в *чугуне*. Он несколько повышает механические свойства *чугуна*, особенно в тонкостенных отливках; связывает *серу*, оказывающую негативное влияние, в соединение MnS . Однако с увеличением содержания *марганца* повышается способность *чугуна* к отбеливанию - появлению, особенно в поверхностных слоях отливок и тонких сечениях, структуры *белого* или *половинчатого чугуна*. Содержание *марганца* в *серых чугунах* не должно превышать 1,25% ($0,2 \div 1,1\%$).

Сера является вредной примесью в *чугуне*. Она ухудшает литейные свойства *чугуна* и способствует его отбеливанию (если содержание *серы* больше 0,15%). *Сера* попускается в *чугунах* в минимальных количествах $0,08 \div 0,012\%$.

Фосфор практически не влияет на *графитизацию чугуна*. Он улучшает литейные свойства *чугуна*, в частности жидкотекучесть. Это объясняется тем, что при достаточном содержании *фосфора* кристаллизация *чугуна* происходит с образованием наиболее *легкоплавкой фосфидной эвтектики*, улучшающей литейные свойства *чугуна*: в *серых чугунах* — двойной *эвтектики* (*аустенит* + Fe_3P), в *белых* — тройной *эвтектики* (*аустенит* + Fe_3C + Fe_3P). Включения *фосфидной эвтектики* способствуют повышению износостойкости *серого чугуна*, но увеличивают его хрупкость.

Обычно в *сером чугуне* *фосфора* содержится до $0,3 \div 0,4\%$ *P*. При изготовлении художественных отливок с целью повышения жидкотекучести содержание *фосфора* в *чугуне* может быть повышено до 1%. Повышенное содержание *фосфора* рекомендуется и для антифрикционных *чугунов*, работающих при малых удельных давлениях. Кроме обычных применяют *легированные чугуны*, в которые специально для получения определенных свойств вводят легирующие элементы, например такие, как *алюминий*, *медь*, *кремний* (свыше 3,5%), *марганец* (свыше 1%), *хром*, *никель* и др.

Модифицирование чугунов. При ускоренном охлаждении отливок из *серого чугуна* процесс графитизации не успевает полностью завершиться и поверхностные слои отливок подвергаются отбеливанию. В результате этого структура *чугуна* по сечению отливки получается неоднородной: на поверхности структура *белого чугуна*, а в сердцевине — *серого*, между ними переходная зона со структурой *половинчатого чугуна*. Неоднородная структура может сформироваться и в разных частях одной и той же отливки, имеющих различную толщину.

Для получения равномерной структуры и высокого качества *чугунных отливок* литейщики регулируют химический состав и скорость охлаждения и применяют модифицирование. Для этого в жидкий сплав перед разливкой в небольшом количестве вводят специальные добавки — *модификаторы* — ферросилиций, силикокальций и др. Модифицирование этими элементами позволяет получить *чугун*, в котором металлическая основа состоит главным образом из перлита, а графит, хотя и сохраняет пластинчатую форму, имеет оптимальные размеры, среднюю завышенность и в наименьшей степени разобщает металлическую основу.

Особым преимуществом таких *чугунов* является меньшая чувствительность к скорости охлаждения, благодаря чему удается получить одинаковую перлитную структуру в сечениях отливки толщиной от $5\div 10$ до 100 мм и даже больше при одинаковом химическом составе *чугуна*.

Однако вследствие того, что графит в модифицированных *чугунах* имеет пластинчатую форму, пластичность и вязкость остаются низкими (относительное удлинение $0,5\div 1\%$, ударная вязкость $0,05\div 0,1 \text{ МДж/м}^2$). Модифицированные *чугуны* обладают повышенной герметичностью, и их можно использовать для деталей, работающих под давлением (газовым или гидравлическим).

После модифицирования *чугуна магнием* ($0,03\div 0,07\%$) графит приобретает шаровидную форму. В результате не только повышается

прочность чугуна, но и возрастают его пластичность и вязкость (высокопрочные чугуны).

Виды чугуна

Серые чугуны обозначают (маркируют) буквами С (серый), Ч (чугун) и цифрами, показывающими минимальное значение временного сопротивления при растяжении. Предел прочности серых чугунов при растяжении σ_B 10÷35 кгс/мм² (или от 100 до 350 МПа) [7,8].

Стандартные марки чугунов (ГОСТ 1412—85): СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35; по требованию потребителя допускаются также чугуны марок СЧ18, СЧ21, СЧ24.

Примерный химический состав чугунов стандартных марок: 2,9-3,7% *C*, 1,2-2,6% *Si*, 0,5-1,1 % *Mn*, не более 0,2-0,3% Рине более 0,12-0,15% *S*.

Отливки из *серых чугунов* широко применяют в машиностроении.

Ферритный и ферритно-перлитный *чугуны* марок СЧ10 и СЧ15 имеют временное сопротивление при растяжении соответственно σ_B 100 и 150 МПа; твердость HB 143÷229. Эти чугуны предназначены для работы с небольшими или средними нагрузками. Чугун марки СЧ10 используют для изготовления литых деталей, работающих при малых нагрузках без трения (стойки, основания, кожухи, коробки, изложницы), а СЧ15 — для изготовления деталей, работающих при средних нагрузках и на износ при малых удельных давлениях (тонкостенные отливки в различных отраслях машиностроения, трубы, изложницы и др.).

Перлитные чугуны марок СЧ20 и СЧ25 с временным сопротивлением при растяжении σ_B 200 и 250 МПа и твердостью HB 170÷250 применяют для изготовления деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках (блоки цилиндров, картеры двигателя, поршни цилиндров, станины различных станков и др.).

Перлитные чугуны марок СЧ30 и СЧ35 (σ_s не менее 300 и 350 МПа, HB 180÷269) обладают наиболее высокими механическими свойствами. Их

применяют для работы при высоких нагрузках или в тяжелых условиях износа (зубчатые колеса, гильзы блоков цилиндров, распределительные валы и др.).

Ковкий чугун — это чугун с графитными включениями хлопьевидной формы. Хлопьевидный графит располагается в металлической основе чугуна более компактно, чем пластинчатый, включения его не действуют как острые надрезы (что характерно для пластинчатого графита), поэтому такие включения в меньшей степени ослабляют металлическую основу.

Получают *ковкий чугун* путем специальной термической обработки *белого доэвтектического чугуна* примерно следующего состава: $2,5 \div 3\% \text{ C}$; $0,7 \div 1,5\% \text{ Si}$; $0,2 \div 1\% \text{ Mn}$; до $0,2\% \text{ S}$, до $0,18\% \text{ P}$.

Отливки из *белого чугуна*, подвергаемые отжигу на *ковкий чугун*, должны быть довольно тонкостенными — сечением не более 50 мм . Отливки большей толщины охлаждаются недостаточно быстро, и при кристаллизации в сердцевине образуется пластинчатый графит. Такой *чугун* не пригоден для переработки на *ковкий чугун*, поскольку образующийся в процессе *отжига* графит (*графит отжига*) присоединяется к имеющимся пластинам графита. По этой же причине *белые чугуны*, предназначенные для переработки на *ковкий чугун*, характеризуются пониженным содержанием *углерода* и *кремния* (*графитизирующих элементов*). По структуре металлической основы, которая зависит от режима отжига (*рис. II.19*), *ковкие чугуны* могут быть ферритными и перлитными.

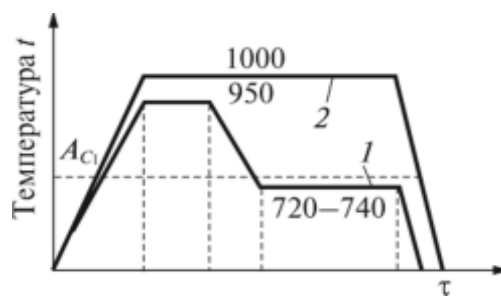


Рис. II.19. Схемы отжига (1, 2) белого чугуна на ковкий чугун

Ферритный ковкий чугун получают путем отжига по режиму 1, схематично показанному на *рис. II.19*. Отливки из белого чугуна медленно

($20 \div 25$ ч) нагревают до $950 \div 1000^\circ\text{C}$ (выше *эвтектоидной температуры*, но несколько ниже *эвтектической*). Далее следует продолжительная выдержка ($10 \div 15$ ч) при этой температуре. В процессе выдержки происходит первая стадия графитизации - распад *эвтектического* цементита и вторичного цементита на аустенит и графит: $C > A + G_{\text{отж}}$. К концу этой стадии *структура чугуна* состоит из аустенита и включений хлопьевидного графита. При последующем медленном охлаждении ($6 \div 12$ ч) до температуры 720°C (несколько ниже температуры *эвтектоидного* превращения) протекает промежуточная стадия графитизации - распад образующегося при охлаждении вторичного цементита. Получающийся графит присоединяется к уже имеющемуся, и это приводит к росту графитовых включений.

После достижения температуры 720°C проводят вторую длительную (30 ч) выдержку, в процессе которой протекает вторая стадия графитизации - распад *эвтектоидного цементита*: $C_{\text{эд}} > \Phi + G_{\text{отж}}$. По завершении этой стадии структура чугуна получается полностью равновесной ($\Phi + G$).

Перлитный ковкий чугун получают путем отжига по режиму 2 (рис. II.19). При этом после первой стадии графитизации отливки охлаждают на воздухе. В таких условиях охлаждения не происходит графитизации *эвтектоидного цементита* и чугун приобретает структуру, состоящую из перлита и графита *отжига*. Излом данного чугуна получается светлым из-за большого количества перлита в металлической основе.

Методы ускоренного отжига белого чугуна на ковкий чугун позволяют сократить время его получения. Так, перед *отжигом* отливок из белого чугуна применяют предварительную *закалку* от $850 \div 900^\circ\text{C}$. Это обеспечивает измельчение структуры и способствует образованию многочисленных центров графитизации - ускоряются протекание первой и второй стадий графитизации и данный процесс сокращается до $10 \div 15$ ч. Температуру нагрева белого чугуна повышают перед разливкой. Кроме того, чугуны легируют незначительными добавками алюминия ($0,015 \div 0,20\%$), бора и других элементов; проводят ступенчатый нагрев при отжиге с выдержкой

при $350\div 400^{\circ}\text{C}$; сокращают время нагрева и охлаждения отливок при отжиге за счет нагрева отливок в нейтральной или защитной среде. В этом случае продолжительность *отжига* сокращается до $24\div 60$ ч.

Маркируют *ковкие чугуны* буквами КЧ (К - ковкий, Ч - чугун) и цифрами, обозначающими минимальные значения временного сопротивления при растяжении и относительного удлинения.

Например, *чугун* марки КЧ35-10 - это *ковкий чугун* с временным сопротивлением при растяжении не менее 350 МПа и относительным удлинением не менее 10% .

Высокопрочный чугун в своей структуре содержит графитные включения шаровидной формы. Такой *чугун* получают модифицированием расплава *магнием*. *Магний* вводят в жидкий *чугун* перед разливкой в количестве $0,03\div 0,07\%$. Под воздействием *магния* при кристаллизации *чугуна* графит приобретает шаровидную форму. Шаровидная форма графита наиболее благоприятна и обеспечивает высокие механические свойства *чугуна* (прочность при растяжении и пластичность). *Чугуны* с шаровидным графитом по механическим свойствам приближаются к сталям, сохраняя при этом хорошие литейные свойства, способность легко обрабатываться резанием, гасить вибрации, обеспечивать высокую износостойкость.

Маркируют высокопрочные чугуны буквами ВЧ (В - высокопрочный, Ч - чугун) и цифрами, обозначающими минимальное значение временного сопротивления при растяжении.

По структуре металлической основы *высокопрочные чугуны* могут быть:

- *ферритными*, которые имеют металлическую основу, преимущественно феррит, в ней допускается до 20% перлита; это *чугуны марок*: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45;

- *перлитными*, имеющими металлическую основу перлит, в ней допускается до 20% феррита (он расположен в виде оторочки вокруг шаровидного графита); это *чугуны марок*: ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80.

Высокопрочные чугуны применяют в авто-, тракторо- и дизелестроении, для изготовления коленчатых валов, поршней и многих других ответственных деталей, работающих при высоких циклических нагрузках и в условиях изнашивания. В тяжелом машиностроении из них изготавливают оборудование прокатных станов (прокатные валки массой до 12 т), детали кузнечно-прессового оборудования, в турбостроении — корпуса паровых турбин, лопатки направляющего аппарата. Во многих изделиях детали из *высокопрочных чугунов* успешно заменяют детали из *стали*.

В производстве *высокопрочных чугунов* весьма эффективна термическая обработка, когда отливки для повышения прочности подвергают закалке и отпуску при $500\div 600^{\circ}\text{C}$, для увеличения пластичности - *отжигу*, который обеспечивает сфероидизацию цементита в перлите.

Антифрикционный чугун используют для изготовления литых деталей (подшипников скольжения и др.), работающих в узлах трения со смазкой. Такие *чугуны* должны обеспечивать низкий коэффициент трения и в связи с этим малые потери на трение и малую скорость изнашивания сопряженной детали (стального вала).

Антифрикционные свойства чугуна определяются перлитной структурой металлической основы, которая создает достаточную прочность детали, наличием фосфидной эвтектики, обеспечивающей повышение износостойкости, и большого количества крупных разрозненных включений графита - в местах его расположения происходят впитывание и удержание смазки.

Маркируют антифрикционные чугуны буквами АЧ (А - *антифрикционный*, Ч - *чугун*) и в зависимости от формы графитных включений буквами С (*серый чугун* с пластинчатым графитом), В (*высокопрочный чугун* с шаровидным графитом), К (*ковкий чугун* с хлопьевидным графитом). Большинство *антифрикционных чугунов* содержат в небольшом количестве специальные добавки *хрома, титана, меди* и других элементов.

С целью уменьшения износа сопряженной детали *марку чугуна* (ГОСТ 1585—85) выбирают так, чтобы его твердость была ниже твердости сопряженной детали. Например, при работе в паре со *стальными валами* используются *антифрикционные чугуны* марок: АЧС-1, АЧС-2 - для деталей, работающих в паре с термически обработанными закаленными или нормализованными валами; АЧС-3 — для работы в паре с термически необработанными валами; АЧС-6 — для работы при температуре до 300°C , АЧВ-1 — для работы с повышенными окружными скоростями.

Отбеленный чугун. Отбеленные *чугунные отливки* имеют на поверхности структуру *белого чугуна*, а в сердцевине — структуру *серого чугуна*. *Отбел* (на глубине $12\div 30\text{мм}$) является следствием быстрого охлаждения поверхности *при отливке чугуна* в металлические формы (*кокиль*) или в сырые земляные формы. *Отбеленный чугун* имеет высокую твердость поверхности и обладает высокой износостойкостью, особенно в условиях абразивного износа.

Отбеленный чугун применяют для изготовления валков листовых прокатных станов, колес, шаров для мельниц и т.д. В этом случае *используют чугуны* с пониженным содержанием *кремния*, что приводит к увеличению склонности *чугуна* к отбеливанию. Примерный химический состав *чугуна*: $2,8\div 3,6\% \text{C}$; $0,5\div 0,8\% \text{Si}$; $0,4\div 0,6\% \text{Mn}$.

II.5.2. Изменения структуры чугунов при охлаждении

Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода более $2,14\%$, имеющие в своей структуре цементит, называются *белыми чугунами*.

Рассмотрим превращение в чугунах (*рис. II.20*). Сплав II с содержанием углерода $4,3\%$, называемый *эвтектическим чугуном*, кристаллизуется по *эвтектоидной* реакции с одновременным выделением двух фаз: аустенита состава точки *E* и цементита. Образующаяся смесь называется *ледебуритом*.

При дальнейшем охлаждении концентрация углерода в аустените изменяется по линии ES вследствие выделения вторичного цементита и к

температуре эвтектоидного превращения принимает значение $0,8\% \text{ C}$. При температуре линии PSK (727°C) аустенит в ледебурите претерпевает эвтектоидное превращение в перлит. Конечная структура эвтектического чугуна представляет собой ледебуритную смесь из перлита и цементита.

Сплав I с содержанием углерода $2,14 \div 4,3\%$ называется доэвтектическим чугуном. Кристаллизация начинается с выделения аустенита из жидкого раствора. Этот процесс идет в интервале температур точек 1÷2. При температуре точки 2 образуется эвтектика (ледебурит). При дальнейшем охлаждении из аустенита, структурно свободного и входящего в ледебурит, выделяется вторичный цементит. Обедненный вследствие этого аустенит при 727°C (линия PSK) превращается в перлит. Конечная структура доэвтектического чугуна состоит из перлита, цементита и ледебурита.

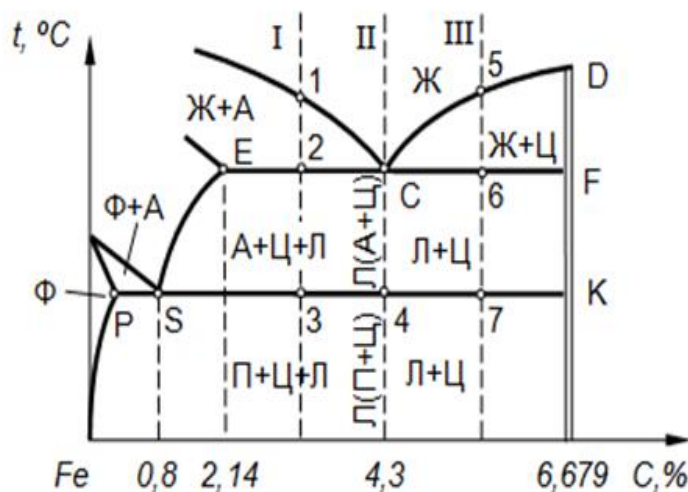


Рис. II.20. Часть диаграммы состояния «Fe – Fe₃C» для чугунов

Сплав III с содержанием углерода более $4,3\%$ называется заэвтектическим чугуном. Кристаллизация начинается с выделения из жидкого раствора цементита первичного. Этот процесс идет в интервале температур точек 5÷6. Кристаллизация заканчивается при температуре точки 6 (линия ECF) эвтектическим превращением с образованием перлита. При дальнейшем охлаждении превращения в твердом состоянии такие же, как в сплаве I. Конечная структура заэвтектического чугуна состоит из цементита и ледебурита.

Белый чугун

Кристаллизация начинается на линиях BC и CD и заканчивается на линии ECF. Доэвтектический *белый чугун* (сплав VI) начинает кристаллизацию с образования в жидком растворе кристаллов аустенита. При этом состав жидкости изменяется по линии BC в сторону точки C. При температуре линии ECF (1147°C) состав оставшейся жидкости достигает точки C (4,3% C), и она кристаллизуется в *эвтектику* – ледебурит.

Для *белого чугуна* характерно обязательное наличие структурной составляющей – ледебурита. Другими структурными составляющими *белого чугуна* могут быть перлит и вторичный цементит (*доэвтектический чугун*) либо первичный цементит (*заэвтектический чугун*). Содержание углерода в *доэвтектическом чугуне* находится в пределах $2,14 \div 4,3\%$, в *заэвтектическом* – более 4,3%.

Следовательно, структура затвердевшего *доэвтектического чугуна* вблизи линии ECF состоит из ледебурита и аустенита. При дальнейшем охлаждении *доэвтектического чугуна* из аустенита выделяется вторичный цементит. При этом состав аустенита изменяется по линии ES в сторону точки S. При температуре линии PSK состав аустенита (как структурно свободного, так и входящего в состав ледебурита) достигает точки S, и он превращается в перлит. Таким образом, структура *доэвтектического чугуна* состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита (состоящего из перлита и цементита).

Эвтектический чугун (сплав VII) затвердевает при температуре точки C в ледебурит (смесь аустенита и цементита). При достижении температуры линии PSK аустенитная составляющая ледебурита превращается в перлит, и ниже этой температуры сплав имеет структуру ледебурита, состоящего из перлита и цементита. *Заэвтектический чугун* (сплав VIII) начинает кристаллизацию на линии CD с образованием первичного цементита. При этом состав жидкости изменяется по линии CD в сторону точки C. При

температуре линии ECF состав жидкости достигает точки C, и она кристаллизуется в ледебурит. Следовательно, структура затвердевшего *заэвтектического чугуна* ниже линии ECF состоит из ледебурита и цементита. Такая структура сохраняется до комнатной температуры, но при достижении сплавом температуры линии PSK аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит.

ГЛАВА III

ФИЗИЧЕСКИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Все свойства конструкционных материалов, в том числе и металлов, подразделяются на следующие группы: физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные (рис. III. 1).

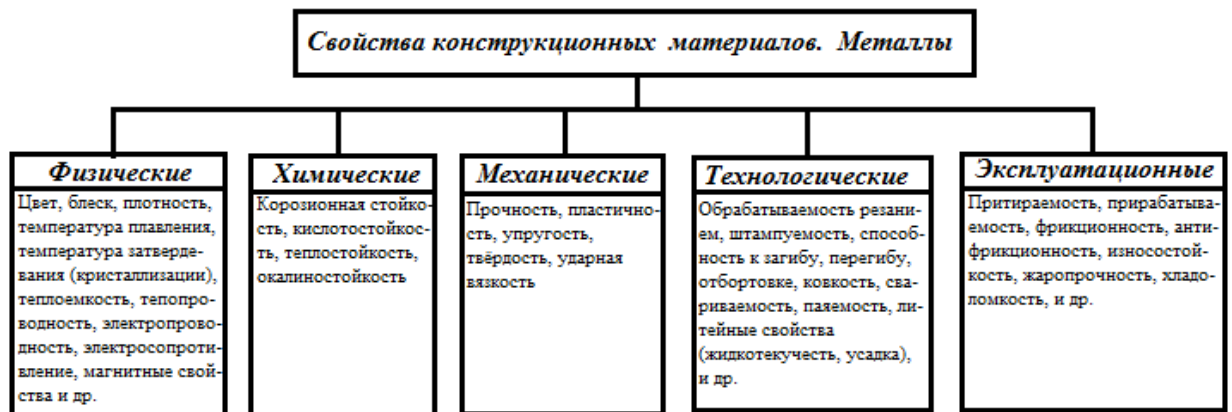


Рис. III. 1. Классификация свойств металлов и сплавов

§ III.1. Физические и химические свойства

Физические свойства - свойства конструкционных материалов, которые определяют состояние вещества при определенных условиях (нормальной или повышенной температуре, нагревании до жидкого и

охлаждении до кристаллического состояния), поведение в электрическом или магнитном поле, при пропускании электрического тока или теплоты и т. д.

К физическим свойствам относятся цвет, плотность, плавкость (температура плавления), кристаллизация (температура затвердевания), линейное и объемное расширение при нагревании, электро- и теплопроводность, теплоемкость, способность намагничиваться и др.

Физические свойства имеют различные единицы измерения, которые дают сравнительную характеристику конструкционных материалов. Знание физических свойств металлов и их сплавов дает возможность научно обосновывать выбор технологии обработки и условия эксплуатации.

Физические характеристики в производственных условиях (конструирование, технология, экспериментирование и эксплуатация) являются основными показателями, определяющими конкретное применение различных конструкционных материалов во всех отраслях науки и техники [1,2].

Химические свойства металлов и сплавов

В материаловедении под химическими свойствами понимают характер взаимодействия атомов металлов с другими металлами или неметаллами в процессе кристаллизации (затвердевания). В зависимости от механизма взаимодействия атомов соединяемых веществ образуются различные химические структуры (сплавы) [3].

Рассмотрим химические свойства не с точки зрения механизма взаимодействия атомов соединяемых веществ, а с точки зрения механизма активности или инертности к внешней среде, взаимодействия с этой средой свободных поверхностей деталей, механизмов, машин и различных сооружений. Благодаря взаимодействию с внешней средой на свободных поверхностях конструкционных материалов происходят изменения химического состава. Эти изменения проявляются в различных формах в зависимости от степени активности материалов. Наиболее активно

химическое взаимодействие происходит с кислородом и водой (происходит окисление). При этом железо покрывается толстым коричневым слоем коррозии (ржавчины), медь - зеленым налетом, алюминий - серой пленкой, свинец быстро тускнеет и т. д. При нагревании железо и железоуглеродистые сплавы активно окисляются, превращаясь в окалину. Особенно это происходит в среде каких-нибудь газов. При активном образовании окалины при повышенной температуре уменьшается объем и масса металла. Этот процесс называется угаром металла. Из-за низкой химической стойкости некоторых конструкционных материалов (сталей, чугунов) особенно активно идет химическое изменение или разрушение и окисление поверхности деталей в таких средах, как воздух, морская вода, кислоты, щелочи и др.

Коррозия металлов. Коррозия (от лат. *corrosio* - разъедание) - это разрушение поверхностного слоя металлов под воздействием окружающей среды (рабочего тела). В процессе коррозии происходит потускнение поверхности, разъедание, травление и разрушение металла. Эти процессы ограничивают применение металлов [4].

Разрушение поверхности металла коррозией может быть вызвано несколькими причинами: искаженной формой атомно-кристаллической структуры, химической неоднородностью (ликвацией), остаточными напряжениями, окружающими физическими условиями и другими многочисленными факторами. Скорость процесса коррозии можно уменьшить или вообще приостановить, если точно определить ее природу, меняя физические условия работы деталей и механизмов или химический состав металла, его структуру.

В зависимости от рабочей среды, в которой постоянно находятся детали, механизмы и конструкции из металлов и их сплавов, процессы коррозии подразделяются:

- на газовую коррозию (в сухих газах);

- атмосферную коррозию (в условиях открытой атмосферы, влажного естественного воздуха);
- коррозию в жидких растворах (воде, электролитах, неэлектролитах, нефти и нефтепродуктах);
- почвенную коррозию.

Коррозионные разрушения металлов и сплавов бывают следующих видов (рис. III. 2):

- общая, или сплошная, коррозия поверхности металлов;
- язвенная коррозия;
- структурно-избирательная коррозия;
- межкристаллитная (интеркристаллитная) коррозия;
- местная коррозия;
- коррозия под напряжением;
- щелевая коррозия;
- биокоррозия.

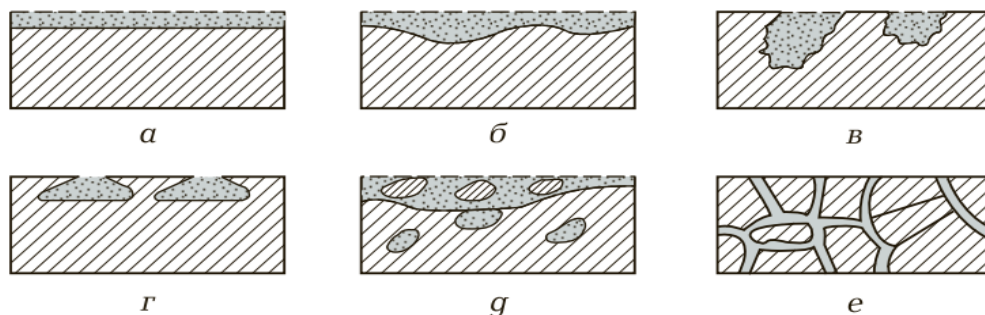


Рис. III. 2. Виды коррозионных разрушений металлов и сплавов:

а — сплошная равномерная коррозия; б — сплошная неравномерная коррозия; в — язвенная коррозия; г — подповерхностная коррозия; д — избирательная коррозия; е — межкристаллитная коррозия

Все виды коррозии, изображенные на рис. III. 2, характерны тем, что в конструкциях происходит постепенное разрушение поверхности металла. В одних случаях это скрытое коррозионное разрушение, в других открытое. В зависимости от структуры сплава, химической прочности зерен и правильной или искаженной атомной кристаллической решетки, а также неоднородности по химическому составу (ликвации) кислород избирательно взаимодействует с металлом. Практика показывает, что структуры твердых растворов

(аустенит) и химических соединений (карбид) обладают более высокой коррозионной стойкостью, чем структура механических смесей и структура твердого раствора феррита. Особенно опасными являются подповерхностная, язвенная и межкристаллитная коррозия. Эти виды коррозии разрушают металл, что может привести к поломке деталей (конструкций).

По механизму воздействия на металл коррозия подразделяется на химическую и электрохимическую.

Химическая коррозия происходит под воздействием на поверхность металлов и сплавов сухого воздуха, газов, жидкостей, не взаимодействующих с электрическим током, различных нефтепродуктов и расплавленных солей. В результате воздействия перечисленных факторов поверхность металла покрывается тонкой оксидной пленкой. У некоторых металлов оксидная пленка плотная и прочная и при нормальных условиях препятствует дальнейшему распространению коррозии. Такие защитные оксидные пленки называются природными.

Под действием высоких температур оксидная пленка теряет защитные свойства, металл угорает и мелкие детали могут полностью разрушиться. Так как химическая коррозия проникает по границам зерен на большую глубину и разъедает эти зерна, изменяя кристаллографическую структуру металла, то с течением времени оксидная пленка увеличивается, трескается и отслаивается. Стальные и чугунные детали покрываются ржавчиной. Ежегодно толщина ее увеличивается. Стальные детали под воздействием сухой атмосферы со временем полностью могут разрушиться.

У таких металлов, как алюминий, свинец, никель, хром и др., в обычных атмосферных условиях оксидная пленка тонкая, плотная и прочная, и атомы кислорода не могут через пленку диффундировать. Такими свойствами обладает железо как основной составной элемент в сталях и чугунах. Эти сплавы первоначально имеют плотную оксидную пленку, но с низкой прочностью, поэтому она быстро растрескивается под действием механических колебаний, смены температур, нагрева и охлаждения и

отслаивается. В связи с этим стали и чугуны активно корродируют в любых условиях. Следствием этого является большая естественная убыль различных стальных конструкций и сооружений, станков, машин и механизмов. Для их восстановления требуются миллионы тонн вновь выплавленных конструкционных материалов - сталей и чугунов.

Электрохимическая коррозия - это образование множества мельчайших гальванических элементов (пар) под действием тока, при котором происходят движение электронов металла в электролит и разрушение этого металла.

Сущность электрохимической коррозии металлов заключается в том, что она протекает в различных жидкостях, проводящих электрический ток. В обычных условиях вода впитывает из атмосферы различные соли с образованием слабых электролитов. Между металлом и электролитами образуется электрическая пара (гальванический элемент). Под ее воздействием происходит медленное постоянное разрушение (коррозия) металла. При этом атомы, находящиеся в узлах кристаллических решеток металла (конструкций и сооружений), вступая в контакт с жидким раствором (электролитом), переходят в этот раствор, образуя коррозию. Электрохимической коррозии подвергаются все металлические конструкции, сооружения, машины, находящиеся под открытым небом, так как они постоянно взаимодействуют с влагой (водой), а также металлы, находящиеся в почве (трубопроводы, опоры линий электропередачи, мосты и т. д.).

Контроль коррозионных разрушений

С целью определения объема коррозионных разрушений изделий из металла проводят различные испытания:

- лабораторные - в искусственных условиях;
- в природных условиях - в почве, атмосфере, пресных водоемах и море;
- эксплуатационные - в естественных условиях работы сооружений, машин, трубопроводов и т. д.;

- ускоренные - имитация естественных условий работы при условии ускорения во времени.

Оценку коррозионных разрушений осуществляют определением потери массы металла или по толщине разрушенного металла.

По коррозионной стойкости металлы классифицируют в соответствии с действующими стандартами по десятибалльной шкале и группам стойкости (табл. III.1).

Оценка коррозии по десятибалльной шкале не допускается в случаях коррозионного растрескивания и межкристаллитной коррозии изделий.

Таблица III.1

Таблица 1. Группы коррозионной стойкости металлов по десятибалльной шкале			
Группа	Характеристика	Скорость коррозии металла, мм/год	Балл
1	Совершенно стойкие	Менее 0,001	1
		Более 0,001 до 0,005	2
2	Весьма стойкие	» 0,005 » 0,01	3
		» 0,01 » 0,05	4
3	Стойкие	» 0,05 » 0,01	5
		» 0,1 » 0,5	6
4	Пониженно-стойкие	» 0,5 » 1,0	7
		» 1,0 » 5,0	8
5	Малостойкие	» 5,0 » 10,0	9
6	Нестойкие	Более 10,0	10

Примечание. При скорости коррозии металлов от 0,5 мм/год и выше оценка коррозионной стойкости производится по группам, а ниже 0,5 мм/год — по баллам стойкости.

Кроме того, по коррозионной стойкости металлы подразделяются на активно корродирующие в атмосферных условиях и воде, медленно корродирующие в атмосферных условиях и воде, коррозионно-стойкие в атмосферных условиях и воде, а также особую группу конструкционных материалов составляют сплавы, работающие в активных средах (кислотах, щелочах, газовой среде) и при высоких температурах [5,6].

Методы защиты металлов от коррозии

В практике разработаны различные эффективные методы защиты металлов от коррозии, которые широко применяются в различных отраслях промышленности и строительстве.

Неметаллические покрытия являются наилучшей временной защитой изделий машиностроения от коррозии. Как правило, в этом случае применяют густые консервационные материалы: защитные масла и смазки. Защитные смазки для изделий в машиностроении применяют для транспортировки и хранения, а также для консервации.

Использование защитных смазок сводится к временной изоляции металла от коррозионной среды. Защитить металлические поверхности изделий от коррозии маслами и смазками полностью не удастся. В процессе транспортировки и временного хранения изделия обертывают в промасленную или парафинированную бумагу для изоляции от влажного воздуха, атмосферных осадков и т. д.

Для повышения антикоррозионной защиты металлических поверхностей изделий в масла и смазки вводят ингибиторы, которые подавляют, нейтрализуют или временно замедляют процесс коррозии. Применение смазок и масел предохраняет металлические поверхности машинной техники, используемой сезонно (машины сельскохозяйственного назначения, военная и аварийная техника), и запасных частей к ней. Для защиты металлических поверхностей применяют смазку ГОИ-54, вазелин, кремний органический, вазелин технический, органический и др.

Лакокрасочные покрытия и фенолформальдегидные смолы изолируют металл от контакта с рабочей средой, увеличивают электрическое сопротивление, защищая металл от химического и электрохимического воздействия. Эти покрытия должны обладать большой механической прочностью, газо- и водонепроницаемостью. Лакокрасочными покрытиями предохраняют от коррозии почти все сооружения, эксплуатируемые в атмосфере, а также станки, трубопроводы, батареи отопления и т. д. Различные трубопроводы, контактирующие с агрессивной средой, покрывают смолами. В отдельных случаях используют покрытия пластмассами.

Металлические покрытия также защищают металлы от коррозии. Одним из способов получения многослойных антикоррозионных покрытий является плакирование. Этот вид покрытий заключается в прокатке листов (труб), лент и других изделий с металлами, устойчивыми к коррозии. В качестве металлов, предохраняющих от коррозии, применяют медь, алюминий, хром и тонкие листы коррозионно-стойкой стали. Получаемый в процессе проката тонкий наружный слой металла (с одной или двух сторон) устойчив к химической и электрохимической коррозии.

Другой способ получения многослойного металлического покрытия - лужение (окунание в жидкий расплавленный металл) медью, оловом, цинком и др.

В практике широко применяется производство листов, ленты, проволоки и другой продукции в виде луженых, хромированных, оцинкованных, алитированных и других видов проката, а также производство труб, покрытых цинком, алюминием, кремнием и другими металлами (сталь-медь, сталь-латунь, сталь-бронза, сталь-никель и др.). К этому типу покрытий относится также металлизация поверхности стальных деталей и заготовок методом напыления расплавленного антикоррозионного металла с помощью пистолета или электрической дуги (плазменное покрытие).

К разновидностям многослойных металлических покрытий относятся также гальванические покрытия. При гальванических покрытиях изделия основного металла, соединенного с отрицательным потенциалом, опускают в электролит, содержащий соли коррозионно-стойкого металла (медь, цинк, хром, никель и др.) или пластины из чистого металла. Эти пластины (или электролиты) заряжаются положительным потенциалом. Под действием разности потенциалов в электролит (пластины металла) выпадают электроны, которые оседают на основном (покрываемом) металле, предохраняя его от коррозии. Достоинством гальванических покрытий является равномерное образование на поверхности деталей коррозионно-стойкого металла —

металла покрытия. Этим методом производят *меднение, хромирование, цинкование, никелирование, серебрение, золочение* и др.

К разновидности металлических антикоррозионных покрытий относятся также *диффузионные покрытия* - насыщение защищаемых поверхностей на небольшую глубину коррозионно-стойкими металлами: *хромом, алюминием, серой* и другими элементами. Этот метод получил название *химико-термической обработки (ХТО)* [7,8,9].

Легирование - один из наиболее эффективных методов получения коррозионно-стойких конструкционных материалов. При легировании в конструкционные материалы в процессе плавки добавляются коррозионно-стойкие металлы и неметаллы. Легирующие элементы, составляющие сплав, образуют на поверхностях конструкционных материалов прочные и плотные оксидные пленки, предохраняющие металлы от коррозии, или образуют с железом структуру аустенита, который обладает высокой стойкостью к коррозии. В практике в качестве коррозионно-стойких конструкционных материалов выпускают хромистые, хромоникелевые, хромоникелевые с титаном и другие легированные стали и сплавы.

Химические покрытия нашли широкое применение в машиностроении. Сущность химических покрытий заключается в образовании на поверхности деталей пленки, состоящей из металла детали и присадочного материала.

В машиностроении применяются следующие виды химических покрытий: *воронение, оксидирование и фосфатирование*.

Воронение заключается в протирании поверхности детали минеральным маслом и нагреве до температуры $270...290^{\circ}\text{C}$.

Разновидностью воронения является нагрев деталей до температуры $450...550^{\circ}\text{C}$ и неоднократное опускание их в минеральное масло. После каждого съема детали тщательно насухо протирают.

В процессе воронения на поверхности деталей образуется пленка, состоящая из солей железа темно-синего или черного цвета. В связи с тем что пленка солей железа, образуемая при воронении, плотная и прочная, она не

пропускает атомы кислорода и воды, предохраняя поверхность деталей от коррозионного разрушения.

Оксидирование заключается в кипячении деталей в водном растворе селитры, едкого натра или пероксида марганца. На поверхности деталей, также как и при воронении, образуется прочная, плотная пленка синего или черного цвета, из магнитного оксида железа (Fe_3O_4), предохраняющая детали от коррозии.

Фосфатирование заключается в обработке деталей в смеси фосфорной кислоты и железистых и марганцевых солей. При этом на поверхности деталей образуется пленка, состоящая из фосфата железа и фосфата марганца. Пленка не растворяется в воде, не пропускает кислород, механически прочная и надежно защищает детали от коррозии. Цвет детали - черный.

Протекторная, или катодная защита - это наиболее эффективный метод защиты сооружений из стали и чугуна - мостов, нефтепроводов, газопроводов, теплосистем и других объектов, имеющих важное народно-хозяйственное значение, для которых применение перечисленных методов защиты от коррозии невозможно из-за их высокой стоимости или больших габаритных размеров этих сооружений.

Сущность этого метода заключается в том, что металлическая конструкция (например, *котёл*) подключается в сеть постоянного тока к отрицательному потенциалу – катоду аккумуляторной батареи. Рядом с металлическим сооружением на глубину промерзания в водоносные слои помещается пластина активного металла (цинк, свинец, магний и др.). Эта пластина соединяется с положительным потенциалом — анодом. Под действием ЭДС электроны катода (пластины, соединенной с отрицательным потенциалом) переходят к аноду. Пластины, разрушаясь, предохраняют основной металл от разрушения.

Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» разработал и предложил большую серию

протекторных сплавов и конструкций протекторов, которые успешно применяются в судостроении, нефтедобывающей, нефтяной, газовой промышленности, машиностроении и коммунальном хозяйстве.

В настоящее время Богословский алюминиевый завод (Свердловская область) освоил выпуск алюминиевых сплавов, которые предназначены для производства протекторов широкого диапазона (марки АП-1, АП-2, АП-3 и др.).

Из этих сплавов выпускают протекторы различных типов и конструкций: П-КОА-10, П-КОА-3 (одинарные), П-ККА-13, П-ПОА-10 (конечные), П-КЛА-15 (линейные). Выпуск протекторов различных конструкций и назначений предусматривают ГОСТ 26251—84* и ТУ 48-0102-113/0—90.

Протекторы характеризуются следующими параметрами: срок службы от 1 до 50 лет; зона защитного действия от 1 до 300 м². Срок службы зависит от массы протектора.

На основании проведенных исследований электрохимических характеристик алюминиевых протекторов в пластовых и подтоварных водах для нефтегазовых устройств разработана система протекторной защиты от коррозии на срок службы не менее 10 лет при диаметре трубопроводов не менее 320 мм (система ПАКР). Эта система предназначена для протекторной защиты внутренних поверхностей резервуаров внутренних систем от электрохимической коррозии при любом уровне жидкой фазы.

Система состоит из протяженного гальванического анода — протектора, составленного из отдельных стержней, соединенных между собой электросваркой. Анод (*протектор*) размещается на днище резервуара. При уровне воды более 2 м стержни размещаются вертикально.

Скорость анодного растворения не более 4 кг анодов в год. Срок службы не менее 5 лет. Степень защиты не менее 95%.

Схема протекторной защиты металлов от коррозии представлена на рис. III. 3.

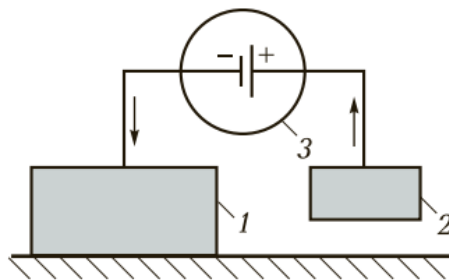


Рис. III. 3. Протекторная защита металлических конструкций и сооружений:
 1 — защищаемая металлическая конструкция (катод); 2 — пластина активно корродирующего металла (анод); 3 — источник ЭДС (батарея постоянного тока)

§ III.2. Механические свойства металлов и сплавов

Механические свойства — это группа свойств, которые характеризуют способность конструкционных материалов выдерживать (или не выдерживать) различные механические нагрузки: прочность, пластичность, упругость, твердость и ударную вязкость [10]. Под воздействием механических нагрузок детали машин и механизмы могут разрушаться (или не разрушаться) в зависимости от механических характеристик. Определение механических свойств необходимо в целях правильного выбора материала, предназначенного для работы с заданными нагрузками. Определение механических свойств позволяет обоснованно построить технологический процесс обработки металла. Механические свойства служат основным способом контроля качества металлических материалов. Наконец, с помощью механических свойств можно очень эффективно исследовать металлы и происходящие в них структурные превращения.

Необходимо отметить, что численные значения механических характеристик существенно зависят от условий испытания, от формы сечения и длины образца. Отсюда ясно, что для получения сравнимых результатов необходимо соблюдать ряд правил и приемов, которые называются методикой испытаний. Для каждого вида наиболее распространенных испытаний в СССР существуют государственные общесоюзные стандарты (ГОСТы), которые определяют условия испытания.

Существует много видов механических испытаний. Однако по характеру и условиям действия нагрузки на образец механические испытания можно разделить на три типа: *испытания со статической, динамической и знакопеременной нагрузками* [11].

Термины и определения испытаний со статической нагрузкой

Для определения механических характеристик конструкционные материалы подвергают следующим видам механических испытаний: испытание на растяжение, сжатие, кручение, изгиб, усталость, динамические испытания (на удар), испытание при повторно-переменных нагрузках.

Напряжение — это отношение нагрузки к площади поперечного сечения детали, воспринимающей эту нагрузку (нагрузка измеряется в ньютонах $[N]$ или килограмм-силах $[кгс]$, а площадь поперечного сечения деталей в квадратных метрах $[м^2]$).

Деформация — это изменение формы и размеров (или разрушение) деталей под действием нагрузок. В зависимости от направления действия механических нагрузок различают следующие виды деформации деталей и механизмов:

- *деформация сжатия*, которую испытывают шобот и баба кузнечного молота, пресса, пуансон и матрица, а также заготовки в процессековки, штамповки и прессования (рис. III. 4, а);
- *деформация растяжения*, которую испытывает трос подъемного крана (рис. III. 4, б);
- *деформация кручения*, которую испытывают шпиндель сверлильного и токарного станков, ходовые винты, валы и др. (рис. III. 4, в);
- *деформация сдвига или среза*, которую можно наблюдать при механической обработке деталей на металлорежущих станках, зубчатых зацеплениях, шпонках, шпильках, штифтах, образующих неподвижные соединения (посадки) деталей и механизмов и т. д. (рис. III. 4, г);

- *деформация изгиба*, характерная для стрелы подъемно-мостового крана, пролетов различных мостов и т. д. (рис. III. 4, д).

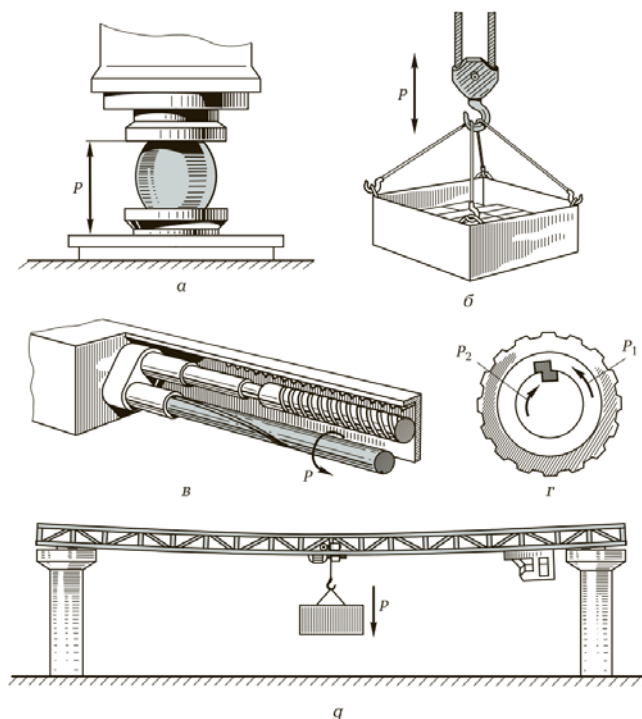


Рис. III. 4. Виды деформации деталей машин и механизмов, возникающих в процессе работы:

а — сжатие; б — растяжение; в — кручение; г — сдвиг (срез); д — изгиб; P, P_1, P_2 — нагрузки

В зависимости от физико-механической природы конструкционных материалов различают *упругие* и *пластические деформации*.

При *упругих деформациях* форма и размеры деталей после снятия нагрузки возвращаются в исходное состояние.

При *пластических деформациях* происходит изменение размеров и формы деталей после прекращения нагрузки (*остаточная деформация*).

Прочность - это способность конструкционных материалов выдерживать (или не выдерживать) различные механические нагрузки не разрушаясь (или разрушаясь). При одинаковых нагрузках и сечениях детали машин, изготовленные из различных конструкционных материалов, имеют разную *прочность*.

Например, трос подъемного крана, изготовленный из стали, поднимает и перемещает груз определенной массы в пределах установленной для данной марки стали *прочности*. Стальной трос диаметром 10 мм разрушается

при нагрузке 5 т, алюминиевая проволока этого же диаметра разрушается при нагрузке 1 т. Таким образом, показателем работоспособности троса (подъема груза) является *прочность* конструкционного материала.

Железнодорожный мост должен быть рассчитан на строго заданную грузоподъемность. *Прочность* определяется пределом прочности при растяжении (временным сопротивлением), который характеризует напряжения или деформации, соответствующие максимальным (до разрушения образца) значениям нагрузки.

Предел прочности σ_b , МПа/м², определяется по формуле

$$\sigma_b = P_{max} / F_0, \quad (III.1)$$

где P_{max} - наибольшая нагрузка, МПа (кГ/мм²); F_0 - площадь поперечного сечения образца (детали) до растяжения, мм². Эта величина также называется временным сопротивлением разрыву.

Пластичность - это способность конструкционных материалов изменять свою форму и размеры под действием нагрузки и сохранять остаточную деформацию после снятия нагрузки. Пластичность - свойство, обратное упругости. Пластичность характеризуется относительным удлинением и относительным сужением.

Относительное удлинение δ , %, показывает, насколько увеличилась длина образца в процессе растяжения, и определяется по формуле

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100, \quad (III.2)$$

где l_0 - длина образца до растяжения, мм; l_1 - длина образца после растяжения, мм. Этот параметр является безразмерным, поскольку при его подсчете длину делят на длину.

Относительное сужение Ψ в %, показывает, на сколько процентов уменьшится площадь поперечного сечения образца после растяжения, и определяется по формуле

$$\Psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} 100, \quad (III.3)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения образца до растяжения, [мм²]; S_1 — площадь поперечного сечения образца после растяжения, [мм²].

Величина *пластичности* зависит от физико-механических свойств конструкционных материалов, их хрупкости. Хрупкие материалы при растяжении или других видах деформаций разрушаются без удлинения (изгиба), внезапно (например, серые чугуны), поэтому хрупкость является отрицательным свойством материалов.

Свойство *пластичности* широко используется в производстве деталей из конструкционных материалов методом деформирования (прокатки, волочения,ковки, штамповки, слесарных операций и др.). При этом металл в горячем состоянии деформированию подвергается значительно легче, чем в холодном состоянии. При деформировании в холодном состоянии заготовки получают *наклеп* (упрочнение). Повышается *твёрдость, прочность, ударная вязкость*. Устраняется *хрупкость*, уменьшается *пластичность*.

При горячем деформировании конструкционных материалов улучшаются их механические свойства: *твёрдость, пластичность, прочность* и *ударную вязкость*; устраняется *хрупкость*. При деформировании как в холодном, так и в горячем состоянии пластическая деформация происходит по следующим физическим законам:

- наименьшего сопротивления металла;
- постоянства объема;
- расширения металла при нагревании и сужения его при охлаждении;
- поверхностного трения.

Эти важные технологические законы учитываются при выборе технологических режимов горячего и холодного деформирования.

В практике конструкционные материалы должны обладать высокой *прочностью*, некоторой *пластичностью*. Отсутствие пластичности приводит к внезапному разрушению деталей. Примеры пределов *прочности*, относительного удлинения и сужения некоторых материалов приведены в *табл. III.2*.

Таблица III.2

Таблица 2. Пределы прочности и пластичности некоторых конструкционных материалов			
Марка (группа) конструкционного материала	Предел прочности σ_b , МПа (кгс/мм ²)	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение Ψ , %
Сталь низкоуглеродистая (марок 08 — 10)	330 ... 350 (33 ... 35)	31 ... 33	55 ... 60
Сталь высокоуглеродистая (марок 75 — 85)	1 100 ... 1 150 (110 ... 115)	8 ... 9	30
Медь чистая (марка М1к)	220 ... 240 (22 ... 24)	45 ... 50	75
Латунь (марка Л80)	320 (32)	52	70
Чугун серый (марка СЧ30)	300 (30)	—	—

Статические испытания

Существует три принципиально разных типа напряжений и деформаций: *растяжения*, *сжатия* и *сдвига*. Эти типы напряжений схематически изображены на *рис. III. 5*.

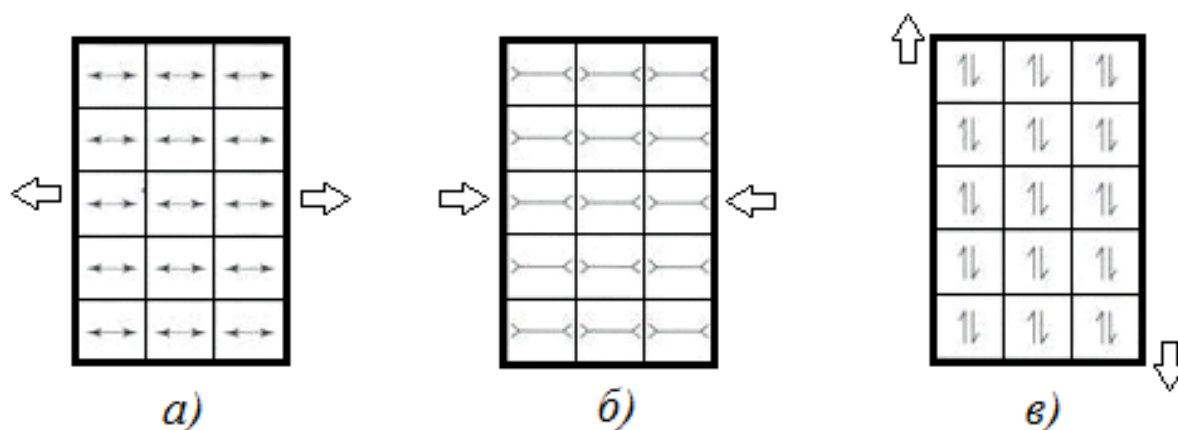


Рис. III. 5. Три основных вида напряжений: (а) растяжения; (б) сжатия; (в) сдвига

Напряжение и деформация не являются свойствами материала, но они позволяют определить ряд механических свойств, которые без этих характеристических параметров невозможно было бы оценить.

На выше приведенном *рисунке III.5,а* напряжение возникает под воздействием продольной нагрузки (то есть, нагрузки, действующей вдоль длины стержня), однако на практике направление действия нагрузки может быть любым (*рис. III.5,б; рис. III.5,в*), а в большинстве случаев на объект будет воздействовать не одна, а несколько разнонаправленных по величине

сил. Эти нагрузки вызывают возникновение сложных напряжений в образце и, в этой связи, требуется проводить *статические испытания на растяжение, сжатие, ползучесть, длительную прочность, кручение, изгиб*, а также определение *твёрдости*. Наиболее широко применяются испытания на *растяжение*, поскольку они дают возможность наиболее подробно и полно изучить свойства металла при упругой и пластической деформации. Столь же широко используют измерение твёрдости.

Испытание материалов на растяжение

Для того чтобы представить себе наглядно напряжение и деформацию, следует рассмотреть натяжение стержня, изготовленного из конкретного материала (*рис. III. 6*). Предположим, что на стержень будет действовать сила растяжения, или растягивающая нагрузка. Под воздействием этой нагрузки стержень растянется.

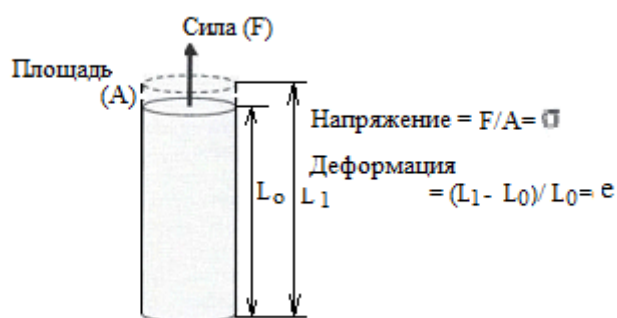


Рис. III. 6. Образец материала в виде стержня растягивается в направлении продольной оси

Понятно, что если нагрузка будет слишком высокой, то стержень может разрушиться (то есть, разорваться или деформироваться). Нагрузка, при которой произойдет разрушение стержня, является мерой прочности стержня, однако не любого, а того, который имеет определенный размер и изготовлен из конкретного материала. Нагрузка, воздействие которой стержень может выдержать без разрушения, возрастет при увеличении диаметра стержня, и понизится при уменьшении его диаметра.

Длина, на которую вытянется стержень к моменту разрушения, зависит от начальной длины стержня: чем длиннее стержень до начала испытания,

тем больше он вытянется. Таким образом, сила и удлинение не являются идеальными способами оценки механических свойств материала. Для того, чтобы преодолеть зависимость результата испытания от размеров испытываемого стержня, были введены такие характеристические параметры, как *напряжение* s , и *деформация* e , и им даются следующие определения: *напряжение* - это сила, действующая на единицу площади поперечного сечения материала, а *деформация* - это изменение размера единицы длины, вызванное приложением силы.

Таким образом, если мы будем растягивать стержень, то есть, приложим к нему силу F вдоль его длины, то напряжение σ может быть описано формулой, аналогичной формуле (III.1):

$$\sigma = F/A, \quad (III.4)$$

где A — площадь поперечного сечения стержня. Единицами измерения напряжения являются ньютоны на кв. метр ($N/m^2 = \text{Паскаль} = Pa$), а длина стержня изменится от исходной длины до длины растянутого стержня.

Возникшую в результате этого *относительную деформацию* можно определить по формуле (III.2).

Существует возможность измерить растяжение стержня под действием сил разной величины практически для любого материала и построить кривую зависимости *относительной деформации* от *напряжения*. Имея такую информацию, можно предсказать величину растяжения в зависимости от приложенной силы (нагрузки) для стержней любой длины и с любой площадью поперечного сечения. Более того, можно сравнить реакцию разных материалов на приложение одинаковых по величине растягивающих нагрузок.

Испытания на растяжение обычно сопровождаются построением графика зависимости деформации образца от приложенной нагрузки - так называемой диаграммы растяжения.

Испытание на растяжение металла заключается в растяжении образца с построением графика зависимости удлинения образца (Δl) от

прилагаемой нагрузки (P), с последующим перестроением этой диаграммы в диаграмму условных напряжений ($\sigma - \varepsilon$).

Испытания на растяжение проводятся по ГОСТ 1497-84 [12], по этому же ГОСТу определяются и образцы на которых проводятся испытания.

Испытанию подвергают стандартные по форме и размерам круглые в сечении или плоские образцы, имеющие утолщения на концах (головки).

Деформация образца выражается в изменении его первоначальной длины. Различают абсолютное удлинение $\Delta l = l - l_0$ (где l_0 - первоначальная, а l - длина образца в данный момент) и относительное удлинение δ , под которым понимают отношение абсолютного удлинения к первоначальной длине образца, выраженное в процентах $\delta = (\Delta l / l_0) 100\%$, в соответствии с (III.2).

Машины для испытания снабжены прибором, который записывает диаграмму растяжения в координатах: приложенная нагрузка - абсолютное удлинение. На *рис. III. 7* приведена диаграмма растяжения отожженной малоуглеродистой стали.

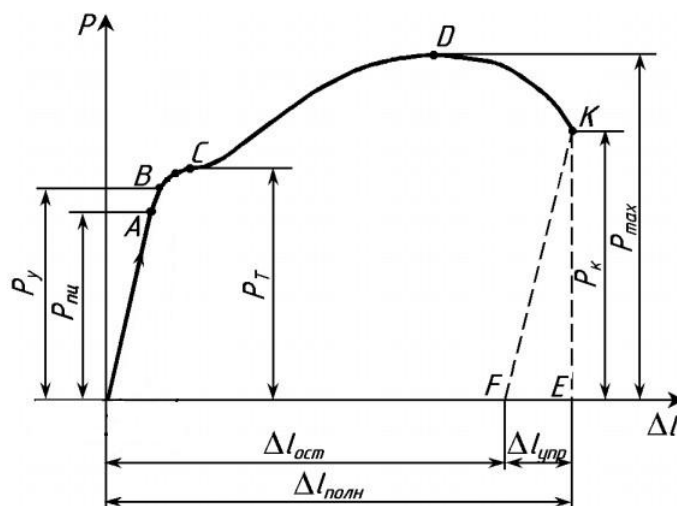


Рис. III. 7. Диаграмма растяжения (P - нагрузка, Δl - удлинение)

Как видно, при малых нагрузках наблюдается прямая пропорциональная зависимость между приложенной нагрузкой и удлинением. За точкой A кривая растяжения отходит от прямой σ_A и плавно поднимается до точки B , где наблюдается переход к более или менее

горизонтальному участку, так называемому участку текучести BC , после которого снова начинается подъем кривой. Нагрузка P_{nc} (ордината точки A), превышение которой вызывает нарушение закона пропорциональности, служит для вычисления *предела пропорциональности* по формуле: $\sigma_{nc} = P_n/S_0$, где S_0 - площадь начального поперечного сечения образца. Напряжения, не превышающие *предела пропорциональности*, практически вызывают лишь упругие деформации, полностью исчезающие после снятия нагрузки, т. е. здесь реализуется закон Гука.

Предел пропорциональности нередко отождествляют с *пределом упругости*. Однако это не совсем правильно. Величину *предела упругости* определяет нагрузка P_y (ордината точки B), наибольшая из сил, которую выдерживает образец, не давая признаков остаточной деформации. Точка B может оказаться лежащей немного выше или ниже точки A или совпадать с ней на кривой растяжения, поэтому различие *предела упругости* и *предела пропорциональности* обычно невелико.

Часто *предел упругости* определяют как *напряжение*, при котором остаточная деформация достигает некоторой величины, например 0,01% ($\sigma_{0,01}$) или 0,05% ($\sigma_{0,05}$). Это важная характеристика, так как многие детали машин и конструкции рассчитывают так, чтобы рабочие напряжения в них не превышали *предела упругости*.

Предел текучести $\sigma_T = P_T/S_0$ определяет наименьшее напряжение, при котором металл деформируется без заметного увеличения нагрузки. Это явление достаточно ярко выражено лишь у малоуглеродистых сталей. Большинство металлов и сплавов не имеют ярко выраженной площадки *текучести*. Поэтому обычно определяют условный *предел текучести* как *напряжение*, при котором образец приобретает *остаточное удлинение*, равное 0,2% от первоначальной длины (0,02).

Следующей важной характеристикой *прочности* является *предел прочности* $\sigma_B = P_B/S_0$ - напряжение, определяемое как отношение наивысшей нагрузки к начальной площади поперечного сечения образца. Эту величину

называют также *временным сопротивлением разрыву*. Для хрупких металлов превышение этого напряжения приводит к разрушению образца, пластичные же металлы продолжают еще некоторое время деформироваться не разрушаясь (участок кривой *DE*). При этом нагрузка падает, а деформация сосредоточивается в одном месте образца, что приводит к образованию местного сужения, называемого шейкой. В этом месте и происходит разрыв образца. Таким образом, хотя условное напряжение, определяемое как отношение нагрузки к первоначальному сечению образца, при образовании шейки падает, истинное напряжение продолжает расти, так как нагрузка теперь приходится на меньшую площадь - площадь образовавшейся шейки.

Не менее важными характеристиками, определяемыми *при испытаниях на растяжение*, являются *характеристики пластичности* - *относительное удлинение δ* и *относительное сужение ψ* после разрыва образца (см. определение (III.3)). С учётом этого, *относительное сужение* определяется по формуле

$$\psi = [(S_0 - f)/S_0] \cdot 100\%, \quad (III.5)$$

где f - площадь поперечного сечения образца в месте разрыва; S_0 - первоначальная площадь поперечного сечения, как это и указано выше.

Очевидно, что рассмотренные закономерности справедливы не только при растяжении, но и при сжатии, изгибе, сдвиге. Для каждого из этих видов испытаний характерны свои диаграммы деформации и соответствующие показатели пределов упругости, текучести, прочности.

Ещё одно широко используемое в теории деформаций понятие – *ползучесть*. *Ползучестью* называется свойство металлов медленно и непрерывно пластически деформироваться при длительно действующей постоянной нагрузке.

Испытания на ползучесть проводят при постоянной обычно повышенной температуре, соответствующей температуре работы металла в

изделии. *Ползучесть* характеризуют *условным пределом ползучести* и *скоростью ползучести*, определяемым обычно при растяжении образца.

Невозможность определения *истинного предела ползучести* при бесконечно большом времени испытания заставляет определять *условный предел ползучести*, т. е. величину наибольшего напряжения, при котором образец при данной температуре за определенный промежуток времени обнаруживает заданное удлинение или заданную *скорость ползучести*.

Условный предел ползучести обозначают символом σ с цифровыми индексами - двумя нижними и одним верхним. Первый нижний индекс обозначает заданное удлинение в процентах (суммарное или остаточное), второй нижний индекс - продолжительность испытания в часах, верхний индекс - температуру испытания. Например, $\sigma^{700}_{0,2/100} = 300 \text{ МПа}$ означает, что при испытании при 700°C в течение 100 ч остаточное удлинение, равное $0,2\%$, вызывается напряжением 300 МПа . В некоторых случаях два нижних индекса заменяют одним, который обозначает заданную скорость ползучести.

Испытания на длительную *прочность* отличаются от испытания на *ползучесть* тем, что образец доводят до разрушения. Предел длительной прочности определяется как отношение нагрузки, которая вызывает разрушение при данных условиях испытания, к площади поперечного сечения образца. Практически испытывают несколько одинаковых образцов при разных нагрузках, определяют время до разрушения и строят графики зависимости напряжение - время до разрушения. Предел длительной прочности обозначают также символом σ , но уже с двумя числовыми индексами, из которых верхний показывает температуру испытания, а нижний - время до разрушения в часах (например, σ^{700}_{1000}).

Динамические испытания металлов необходимы в тех случаях, когда работа деталей связана с ярко выраженными динамическими нагрузками. Данный вид испытаний необходим по той причине, что некоторые металлические материалы, достаточно пластичные при статических

нагрузках, оказываются хрупкими при динамическом воздействии, особенно при пониженных температурах.

Твердость конструкционных материалов

Твердость — это способность конструкционных материалов противостоять проникающим нагрузкам, способность материала сопротивляться проникновению в него другого, *более твердого*, материала.

Высокой твердостью должны обладать металлорежущие инструменты (резцы, сверла, фрезы и т. д.), а также поверхностно упрочненные детали.

Свойство *твердости* проявляется при обработке материалов резанием, в подшипниках качения и скольжения, зубчатых зацеплениях и различных трущихся деталях и механизмах. Чем выше *твердость* деталей и инструмента, тем выше износостойкость и надежность работы механизмов и стойкость режущих инструментов. В зависимости от твердости обрабатываемого материала выбираются режимы обработки заготовок резанием. *Твердость* режущего инструмента обуславливает их стойкость (время работы от заточки до заточки).

Конструкционные материалы в сыром состоянии имеют низкую твердость. Для повышения износостойкости деталей и инструмента их подвергают различным видам термической или химико-термической обработки, в процессе которой твердость повышается в 2 - 3 раза. В металловедении определение *твердости* конструкционных материалов основано на вдавливании в испытуемый образец какого-либо наконечника (*индентора*) под нагрузкой.

Измерение микротвердости

Определение *твердости* представляет собой другой вид статических испытаний, очень широко используемый в заводской и исследовательской практике. Этот вид испытаний, прост, не требует много времени и не связан с разрушением материала. Под *твердостью* понимают сопротивление местной *пластической деформации на поверхности*. Способы и условия создания

деформации при определении *твёрдости* весьма разнообразны. Самое большое распространение получили методы, при которых стандартный наконечник (*индентор*) медленно вдавливается в испытываемый материал с определенной силой. В результате возникает *местная деформация* материала, выражающаяся в образовании отпечатка, площадь или глубина которого после снятия нагрузки, служит *мерой твёрдости*.

Испытания на *твёрдость* используются не только как средство контроля материалов, но и как средство для исследования фазовых и структурных превращений.

В практике определения *твёрдости* металлов известны методы: упругой отдачи, ударного отпечатка и царапания (резания).

Определение *твёрдости* вдавливанием является наиболее распространенным методом. Прибор для определения твёрдости представляет собой металлографический микроскоп с механизмом для вдавливания алмазной пирамиды и устройством для замера отпечатков с точностью до десятых долей микрона, поэтому в дальнейшем будем использовать термин *микротвёрдость*.

Поверхность для измерения микротвёрдости готовят так же, как для металлографических исследований. На приборе ПМТ-3 нагружение образца и снятие нагрузки осуществляются вручную.

Результаты испытания главным образом зависят от формы индентора и прикладываемой нагрузки.

Микротвердомер ПМТ-3 представляет собой прибор, предназначенный для измерения микротвёрдости металлов, сплавов, стекла, абразивов, керамики и минералов вдавливанием алмазных наконечников [13,14].

Оптическая схема

Принцип действия *микротвердомера* основан на вдавливании алмазного наконечника (пирамиды) в исследуемый материал под определенной нагрузкой и измерении линейной величины диагонали

полученного отпечатка. Число *микротвердости* определяется делением нормальной нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику, на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка.

Конструкция микротвердомера ПМТ-3М

Основными частями микротвердомера являются штатив с предметным столиком и головка с механизмом нагружения.

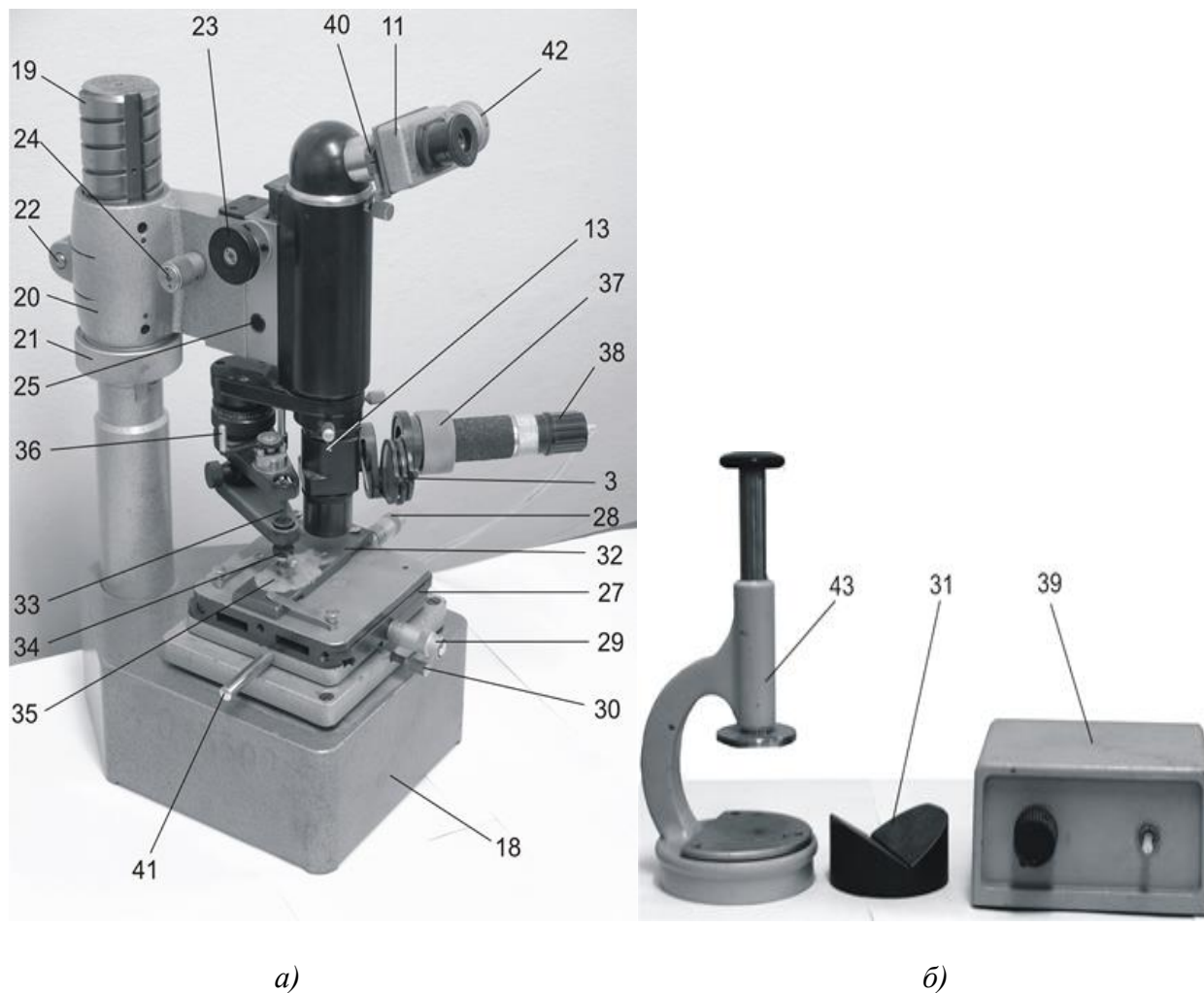


Рис. III. 8. Микротвердомер ПМТ-3:

а) общий вид, б) комплект вспомогательного оборудования

Штатив состоит из основания 18 (рис. III.8,а) и колонки 19, имеющей снаружи ленточную резьбу для перемещения в вертикальном направлении кронштейна 20 с тубусом при помощи гайки 21. Кронштейн закрепляется на колонке при помощи разрезной втулки винтом 22, который при работе должен быть зажат.

В кронштейне размещены механизмы грубого и микрометрического движения тубуса микротвердомера. Вращая барашки 23 грубого движения и барашек 24 микрометрического движения, можно перемещать тубус вверх и вниз.

Ход механизма грубого движения можно регулировать. Если один барашек грубого движения немного развернуть относительно другого, ход движения тубуса будет тяжелее или легче в зависимости от того, в какую сторону развернуты барашки. Кроме того, механизм грубого движения можно застопорить при помощи рукоятки 25. На барашке 24 с обратной стороны прибора имеется шкала, одно деление которой соответствует 0,002 мм подъема при опускания тубуса.

Предметный столик 27 укреплен на основании штатива тремя винтами. Верхняя часть столика, на которую устанавливается предмет, может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью винтов 28 и 29. Отпустив стопорный винт 30, можно за рукоятку поворачивать столик от упора до упора.

Призма 31 (см. *рис. III.8,б*) применяется при исследовании поверхностей цилиндрических предметов. На пластинку 32 с помощью пластилина 35 можно поместить предмет любой конфигурации.

Механизм нагружения состоит из штока 33, укрепленного на двух пружинах, расположенных внутри корпуса механизма. В держатель 34 (*рис. III.8,а*) вставляется алмазный наконечник, а на утолщенную часть штока кладется гиря из разновеса. Для получения отпечатка шток опускают плавным вращением рукоятки 36 арретира против часовой стрелки.

Осветитель 37 укреплен на тубусе микроскопа и служит для освещения исследуемого предмета. При повороте рукоятки 13 от упора-до упора осветитель позволяет рассматривать предмет как в светлом, так и в темном поле. Равномерное освещение достигается перемещением и разворотом патрона с лампой 38.

При установке патрона с лампой необходимо соблюдать осторожность, так как сдвиг осветителя вызовет нарушение юстировки прибора.

Светофильтры 3 осветителя предназначены для повышения контрастности исследуемого предмета.

Лампа осветителя питается от сети через блок питания 39 (рис. III.8,б).

Винтовой окулярный микрометр 11 закрепляется на трубке насадки винтом 40.

Работа на приборе

1. Закрепите при помощи прессика 43 (рис. III.8,б) испытуемый предмет пластилином на пластинке 32 (рис. III.8,а) так, чтобы его исследуемая поверхность расположилась параллельно рабочей плоскости столика, на которой устанавливается пластинка с испытуемым предметом. Поверхность испытуемого предмета должна быть плоской, чистой, с шероховатостью не грубее 9-го класса, т.е. среднее арифметическое отклонение профиля (R_a) не должно быть более 0,32 мкм.

При измерении микротвердости изделий с криволинейной поверхностью, когда размер отпечатка на один - два порядка меньше радиуса кривизны испытуемого изделия, числа микротвердости имеют относительное значение.

При подготовке поверхности испытуемого изделия необходимо принять меры, исключающие возможность изменения твердости испытуемой поверхности вследствие нагрева или наклепа в результате механической обработки.

На рабочей поверхности алмазного наконечника и поверхности испытуемого изделия не должно быть смазки.

2. Поместите на утолщенную часть штока груз.

3. При положении столика, показанном рис. III.8,а, выберите место на предмете для нанесения отпечатка. Расстояние от центра отпечатка до края предмета или между центрами соседних отпечатков должно быть не менее

трех длин диагоналей отпечатка, минимальная толщина предмета или слоя должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз. При исследовании отдельных структурных составляющих металлических сплавов действуют те же правила. Границей предмета служит граница исследуемого зерна.

4. За рукоятку 41 плавно поверните предметный столик против часовой стрелки до упора, не допуская толчков при подведении к упору. Закрепите столик в этом положении винтом 30.

5. Медленным поворотом рукоятки 36 против часовой стрелки опустите шток так, чтобы алмаз коснулся поверхности исследуемого предмета. Рукоятку поворачивать приблизительно на 180° в течение 10-15 сек. После выдержки в течение 5 сек. под нагрузкой поверните рукоятку в исходное положение.

6. Отожмите винт 30, поверните предметный столик в прежнее положение до упора. Чтобы избежать удара об упор и смещения предмета относительно установленного положения, столик нужно поворачивать очень осторожно.

7. Измерьте диагональ отпечатка при помощи окулярного микрометра. Винтами 28 и 29 столика и вращением барабанчика окулярного микрометра 42 подведите центр перекрестия к одному краю диагонали отпечатка (рис. III.9,а) и произведите отсчет по шкалам окулярного микрометра.

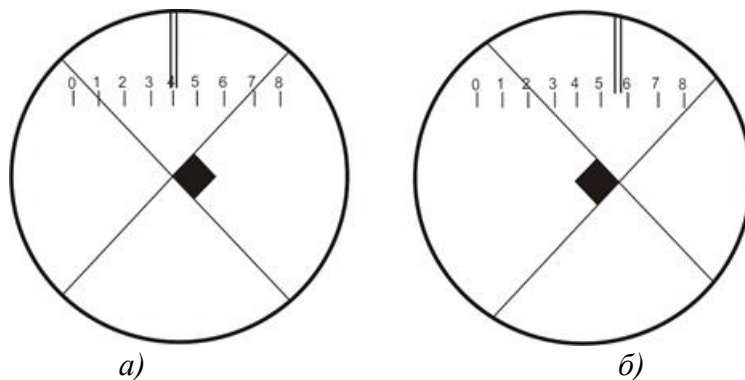


Рис. III. 9. Схема измерения отпечатка.

Затем вращением барабанчика окулярного микрометра в ту же сторону (перемещением центра перекрестия по диагонали отпечатка) совместите

центр перекрестия со вторым краем диагонали (рис. III.9,б) и снова производите отсчет по шкалам окулярного микрометра.

Разность отсчетов, умноженная на действительное значение цены деления барабанчика, даст истинную величину диагонали отпечатка.

Микротвердость - это твердость отдельных участков структуры металла на *микрошлифе*.

Площадь участка, на котором измеряется *микротвердость* должна быть не менее 5 мкм^2 .

Определение *микротвердости* проводится стандартной алмазной пирамидой (с углом при вершине 136°) с нагрузками $0,019 \div 0,980 \text{ Н}$.

Величину микротвердости вычисляют как отношение нагрузки к площади отпечатка по формуле:

$$HV = \frac{F}{S}. \quad (III.6)$$

Численно *микротвердость* можно выразить по формуле

$$HV = \frac{1854P}{d^2}, \quad (III.7)$$

где P – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, [Н]; d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм.

В новых приборах ПМТ-5 предусмотрено автоматическое нагружение, что значительно повышает достоверность получаемых результатов.

В реальной практике статических испытаний широкое применение нашли способы определения твердости по *Бринеллю*, *Роквеллу*, *Виккерсу* (рис. III. 10) [15].

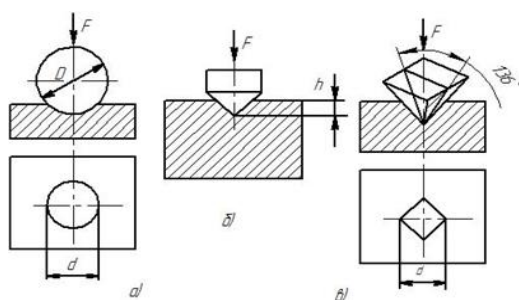


Рис. III. 10. Схемы определения твердости:

а – по Бринеллю; *б* – по Роквеллу; *в* – по Виккерсу

Способ Бринелля [16] основан на том, что в плоскую поверхность металла вдавливают в испытуемый материал под постоянной нагрузкой закаленный шарик (*индентор*) диаметром 10,5 или 2,5 мм. Диаметр шарика и величину нагрузки устанавливают в зависимости от твердости и толщины испытуемого металла.

Испытания проводятся на специальном приборе прессе *Бринелля* (рис. III.11). Столик прибора с установленным на нем образцом поднимают до соприкосновения с шариком. Груз опускается и вдавливает шарик в испытуемый образец. На поверхности образца образуется отпечаток. Чем больше диаметр отпечатка, тем металл мягче. За меру твердости *НВ* принимают отношение нагрузки P к площади поверхности отпечатка шарика диаметром D :

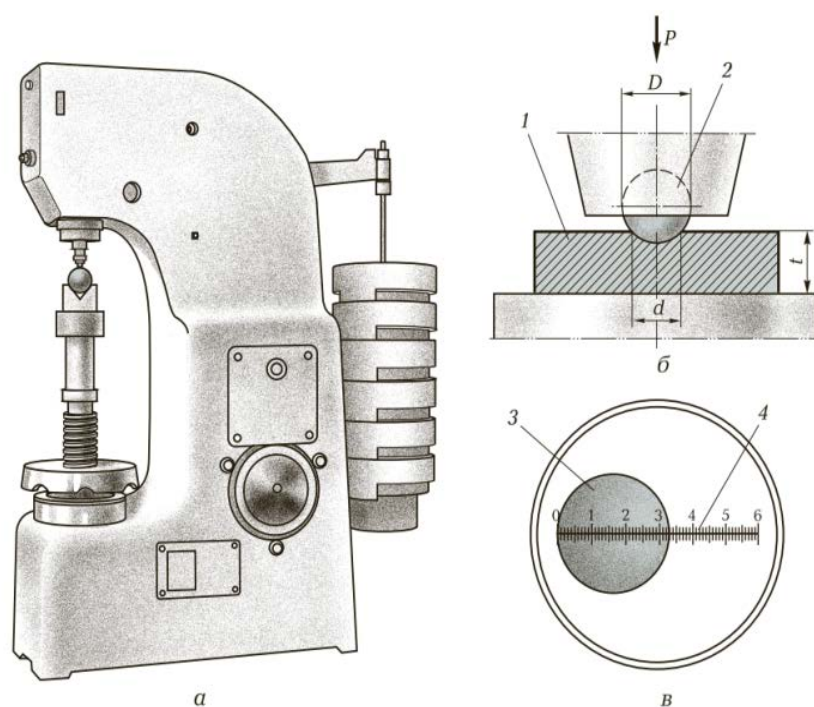


Рис. III. 11. Твердомер Бринелля:

а — общий вид прибора; *б* — схема испытания; *в* — измерение диаметра отпечатка с помощью микрометрической лупы; 1 — образец; 2 — шарик; 3 — лунка; 4 — шкала лупы; P — нагрузка на шарик; D — диаметр шарика; d — диаметр лунки; t — толщина образца

Диаметр отпечатка измеряют оптической лупой, значение твердости определяют по таблице. *Твердость по Бринеллю* обозначается буквами *НВ* и числовым индексом, полученным в результате испытания. Метод прост, достаточно точен и пригоден для измерения среднего уровня *твердости*

материалов ($HB = 6500$). Определение *твердости* конструкционных материалов в сыром состоянии (до закалки) по *методу Бринелля* предусматривает ГОСТ 9012—59.

Величину твердости HB рассчитывают как отношение силы P , действующей на шарик диаметром D к величине поверхности отпечатка. Для определения поверхности отпечатка необходимо знать либо его диаметр d , либо глубину t . Поскольку определение диаметра отпечатка более просто и надежно, то обычно пользуются формулой:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ МПа.} \quad (III.8)$$

На практике пользуются готовыми таблицами, в которых приведены значения HB для отпечатков разных диаметров. Существуют также таблицы, позволяющие правильно выбрать диаметр шарика и нагрузку в зависимости от твердости и толщины испытуемого образца. Так, при испытании стали и чугуна нагрузка должна быть равна $30D^2$, при испытании меди и ее сплавов $10D^2$, алюминия и его сплавов $5D^2$. *Метод Бринелля* не рекомендуется применять для металлов твердостью более 450, так как при этом шарик может деформироваться, что исказит результаты испытаний.

Твердость по Виккерсу (от названия английского военно-промышленного концерна «ВИККЕРС») ГОСТ 2999–75 [17], измеряют на специальных приборах путем вдавливания в поверхность металла четырехгранной алмазной пирамиды с углом $\alpha=136^\circ$ между двумя противоположными гранями. При испытаниях применяют нагрузки от 50 до 1000 Н в зависимости от *твердости* образца. Величину *твердости по Виккерсу* определяют как частное от деления нагрузки P , приложенной к алмазной пирамиде, на поверхность ее отпечатка по формуле:

$$HV = 2P \sin^{\alpha/2} / d^2 = 1,8544 \cdot P / d^2, \quad (III.9)$$

где d - среднее арифметическое обеих диагоналей отпечатка.

Числовое значение *твердости* определяют следующим образом: замеряют с помощью микроскопа длину обеих диагоналей отпечатка после

снятия нагрузки и по среднему значению длины диагонали находят в таблице соответствующее значение *твердости*.

Существуют готовые таблицы, составленные для различных величин нагрузок, которые позволяют быстро найти значение *твердости по Викерсу* в зависимости от величины диагонали отпечатка. Угол между двумя противоположными гранями алмазной пирамиды выбран таким образом, что числа *твердости по Викерсу* и *Бринеллю* до $350 \div 400$ практически совпадают.

Твердость по Викерсу чаще используется для испытания металлов высокой твердости, деталей малой толщины, а также тонких поверхностных слоев. При выборе нагрузки необходимо учитывать, что для получения достоверных результатов толщина слоя не должна быть менее $1,5d$.

На рис. III. 48 приведен микротвердомер типа *ТВ* для определения *твердости по методу Виккерса*. При измерении *твердости по методу Виккерса* основными параметрами являются нагрузка $P = 294,2 \text{ Н}$ (30 кгс) и время выдержки 10...15 с.

Твердость по Виккерсу обозначается индексом *HV* и числом *твердости* (например, 350 HV). При других условиях нагрузка и время выдержки даются после символа *твердости* (например, запись 200HV-25 означает, что *твердость* образца *по Виккерсу* составляет 200 единиц при нагрузке 100,07 Н (10 кгс) и времени выдержки 25 с.

Числовое значение *твердости по Бринеллю* и *Виккерсу* в пределах 100...450 единиц приблизительно совпадает с *истинной твердостью* конструкционных материалов.

В других случаях общего точного перевода чисел *твердости по Виккерсу* в числа *твердости* по другим методам или в *прочность* при растяжении не существует.

В настоящее время выпускаются универсальные приборы нового поколения для определения твердости одновременно *по методу Виккерса* и *Бринелля* — приборы мод. 2137ТУ, ХПО-250 и др.

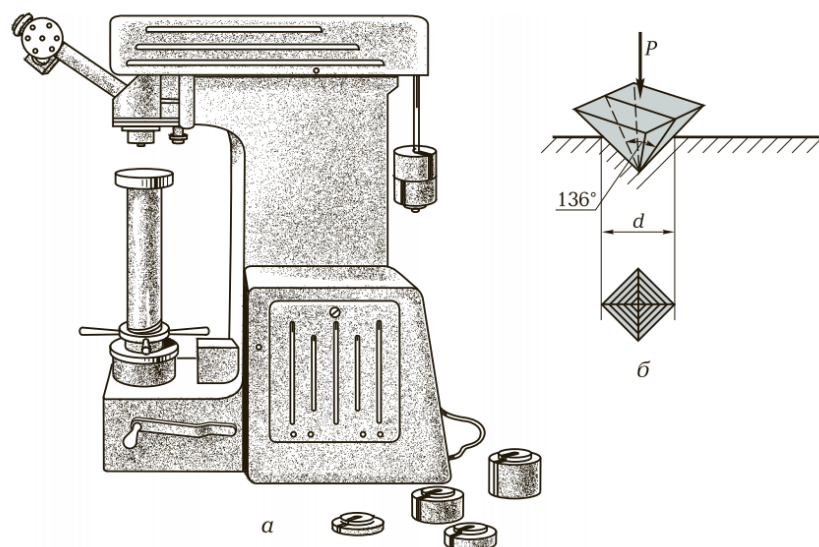


Рис. III. 12. Твердомер Виккерса:

а — общий вид прибора; б — схема испытания; P — нагрузка, действующая на пирамиду; d — диагональ отпечатка

По Роквеллу (способ назван по имени американского металлурга XX века С.П. Роквелла, разработавшего этот метод - ГОСТ 9013–59) *твердость металлов* определяют вдавливанием в испытываемую поверхность алмазного индентора в виде конуса с углом при вершине 120° (шкалы *A* и *C*) или стального закаленного шарика диаметром $1/16$ дюйма, т.е. 1,588 мм (шкала *B*). Соответственно, *твердость* обозначается *HRA*, *HRB* и *HRC*. Значение *твердости* отсчитывают по циферблату индикатора, установленного на приборе.

Твердость по Роквеллу измеряют в условных единицах. За единицу *твердости* принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм:

$$HRC = \frac{0,2 - (H - h)}{0,002}. \quad (III.10)$$

При измерении *твердости по Роквеллу* образец нагружают в две стадии: сначала прикладывают предварительную нагрузку P_0 , равную 98 Н, затем основную P_1 . Основная нагрузка выбирается в зависимости от применяемого наконечника и ожидаемой твердости испытуемого образца.

При измерении по шкалам *A* и *C* применяется наконечник в виде алмазного конуса; основная нагрузка при измерении по шкале *A* составляет

490 Н, по шкале С - 1373 Н. По шкале А проводят испытания сверхтвердых сплавов (*твердостью* более HRC 67 или HV 950). По шкале С испытывают металлы с твердостью HV 240÷950, а по шкале В - с *твердостью* менее HRC 20 (менее HV 240 или HB 235). В последнем случае испытания проводят шариковым наконечником при основной нагрузке 883 Н.

Циферблат прибора снабжен двумя шкалами - черной шкалой при испытании алмазным конусом (по шкалам А и С) и красной - при испытании шариковыми наконечниками (шкала В). Черная шкала имеет 100 делений, красная 130 с порядком цифр, обратным движению стрелки *индентора*. Эти цифры определяют *число твердости по Роквеллу*. Чем глубже отпечаток, тем меньше *число твердости по Роквеллу*. Одно деление соответствует перемещению *индентора* на 0,002мм. Красная шкала смещена относительно черной на 30 делений. Это объясняется тем, что при испытании шариковыми наконечниками глубина отпечатка не бывает менее 0,06мм, т. е. при цене деления 0,002мм начальное перемещение шарика не бывает менее 30 делений. Таким образом, при испытании по любой из шкал *число твердости по Роквеллу* выражается в условных единицах от 0 до 100. Метод Роквелла благодаря простоте и скорости измерения нашел широкое применение в промышленности. На рис. III. 13 представлен *твердомер типа ТК*.

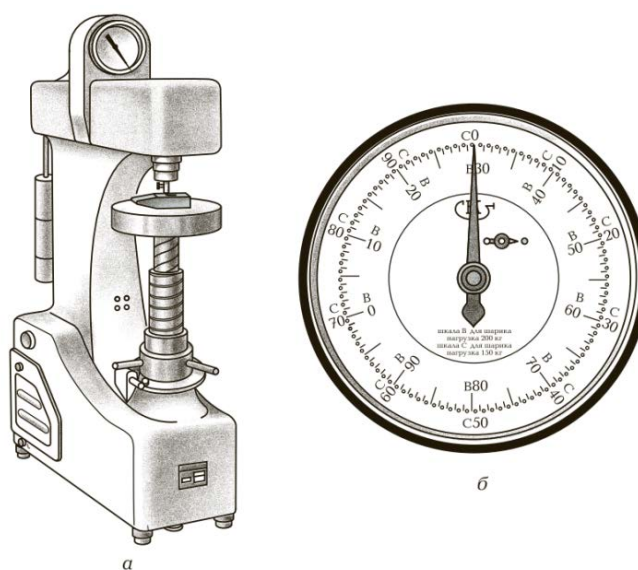


Рис. III. 13. Твердомер Роквелла:

а — общий вид прибора; б — шкала прибора

Твердость, измеренная по методу Роквелла, обозначается символами *HRC*, *HRA* или *HRB* (*A*, *B*, *C* - соответствующие шкалы, зависящие от величины нагрузки) и цифрами (значения *твердости*). Нагрузка выбирается в зависимости от толщины и условий *твердости* испытываемых деталей. Так, стальные закаленные детали толщиной не менее 1 мм испытываются при предварительной нагрузке 100 Н (10 кгс) и основной нагрузке 1400 Н (140 кгс). Общая нагрузка при этом составит 1500 Н , или 150 кгс .

Испытание конструкционных материалов на усталость

Процесс накопления напряжений в деталях и механизмах при знакопеременных нагрузках, приводящих к разрушению, называется усталостью. Свойство конструкционных материалов, обратное усталости, называется выносливостью. В целях определения усталости (выносливости) детали и механизмы подвергают лабораторным испытаниям, которые регламентируются ГОСТ 25.502-79 [19]. Для определения усталости разработана методика, по которой испытанию подвергают 15 образцов конструкционного материала. Каждый образец подвергают нагрузке до полного разрушения или определенного числа циклов (знакопеременных нагрузок). При испытании определяют предел выносливости и по соответствующим параметрам (нагрузкам) определяют гарантийный срок службы (число циклов), время работы деталей машин и механизмов. В процессе эксплуатации на эти детали и механизмы даются соответствующие рекомендации.

Для оценки механических свойств материалов и приблизительного значения предела прочности можно использовать значение твердости, определенной по испытаниям способом Бринелля. Эмпирическое соотношение выглядит следующим образом:

$$\sigma_B \approx 0,33 HB_{max}, \quad (III.11)$$

где σ_B – временное сопротивление, HB_{max} – максимальное значение твердости при нагрузке, с которой начинается плавное понижение твердости.

Для измерения твердости металлов в малых объемах (например, в зернах металла) применяют способ определения *микротвердости*, подобный способу *Виккерса*. Для соизмерения значений твердости, определенных различными способами, применяются переводные таблицы (например: табл. III.3).

Таблица III.3

Перевод величин твердости

d ₁₀ , мм	По Бринеллю HB, МПа	По Роквеллу	По Виккерсу HV, МПа
HRA	HRC	HRB	
2,34		84,5	65,0
2,50		81,0	59,0
2,60		79,0	56,0
2,68		78,0	53,0
2,78		76,0	50,0
2,88		74,5	47,5
2,98		73,0	44,0
3,10		71,0	41,0

§ III.3. Технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов

Технологические свойства

Это группа свойств, которые определяют способность конструкционных материалов подвергаться различным видам обработки в холодном и горячем состоянии. В основе этих свойств лежат физико-механические особенности конструкционных материалов, которые и определяют технологичность заготовок в процессе изготовления различных деталей и инструмента [20].

К технологическим свойствам относятся обрабатываемость резанием, деформируемость (ковкость, штампуемость, способность к загибу, перегибу, отбортовке, получению двойного кровельного замка и т. д.), свариваемость, литейные свойства, паяемость, упрочняемость и др. Технологические

свойства характеризуют поведение материалов в процессе изготовления из них деталей [21,22,23].

Свариваемость - способность конструкционных материалов образовывать прочные, неразъемные соединения путем местного расплавления соединяемых деталей и их последующего охлаждения. Вид *сварки* зависит от источника нагрева. *Сварка* бывает газовая, дуговая, электроконтактная, ультразвуковая, электрошлаковая, кузнечная и др.

Деформируемость — это способность заготовок воспринимать пластическую деформацию в процессе технологических операций: гибки,ковки, штамповки, волочения, проката и прессования без нарушения ее целостности. *Деформируемость* зависит от химического состава, механических свойств, скорости деформации, а также температуры и величины деформации при каждой операции. Оценка *деформируемости* при различных видах операций давлением проводится методом технологических проб, испытаний. Вместе с тем, технологические испытания не дают числовых данных по качеству деформированности конструкционных материалов.

Литейные свойства — это способность конструкционных материалов образовывать качественные отливки без трещин, коробления, усадочных раковин и т. д. К ним относятся *жидкотекучесть*, *усадка* и *ликвация*:

- *Жидкотекучесть* - это способность конструкционного материала в жидком состоянии заполнять полости, узкие и тонкие места литейной формы и давать четкое объемное изображение очертаний отливок. *Жидкотекучесть* зависит от химического состава сплава, температуры заливки, вязкости и поверхностного натяжения. На *жидкотекучесть* влияет также качество полости формы, шероховатость ее стенок, их теплопроводность и характер атмосферы в самой форме. Например, *жидкотекучесть металла* в песчаных сухих формах значительно выше, чем в сырых и металлических формах.

- *Усадка* - это свойство конструкционных материалов уменьшаться в объемных и линейных размерах при затвердевании отливок. *Величина усадки*

выражается в процентах. *Усадка* зависит от химического состава конструкционных материалов и температуры их заливки. При повышении температуры сплава *усадка* отливки увеличивается. *Усадка* различных конструкционных материалов колеблется в пределах 1 ... 2 %. Например, литейный серый чугун имеет величину *усадки* 1 %, сталь - 2 %, сплавы цветных металлов - 1,5 %. Усадка сопровождается образованием в отливках усадочных раковин и рыхлости. Для компенсации усадки, предотвращения усадочных раковин и рыхлости литейную форму конструируют таким образом, чтобы ее полость постоянно подпитывалась жидким металлом, т. е. делают дополнительные устройства — *прибыли*.

- *Ликвация* — неоднородность по химическому составу в отливках, образуемая в процессе кристаллизации сплава. Химическая неоднородность наблюдается как в отдельных частях отливки (*зональная ликвация*), так и внутри отдельных зерен (*внутрикристаллическая ликвация*).

Внутрикристаллическая ликвация устраняется путем термической обработки, а *зональная* - механическим перемешиванием жидкого металла в процессе его заливки в форму.

Большое влияние на *ликвацию* оказывает также скорость охлаждения отливки. При быстром равномерном охлаждении отливки *ликвация* не наблюдается. Кроме того, практикуют охлаждение жидкого металла и его затвердевание по направлению *прибыли*. Разнородность по химическому составу в этом случае образуется в *прибыли*. Таким образом, *прибыль* является универсальным устройством, которое предотвращает явный брак в отливках, образуемый *усадкой*, *короблением* и *ликвацией*.

Паяемость - это способность конструкционных материалов образовывать прочные и герметичные соединения путем *паяния*. В необходимых случаях (например, в радиотехнике и электротехнике) *спаянные* соединения должны обладать определенными физическими свойствами: электропроводностью, индуктивностью и т. д.

Упрочняемость — это способность конструкционных материалов улучшать механические свойства в процессе термической и химико-термической обработки. К *упрочняемости* относятся *закаливаемость*, *прокаливаемость* и *незакаливаемость*:

- *Закаливаемость* — это способность конструкционных материалов воспринимать закалку. Этой способностью обладают все углеродистые и легированные стали с массовой долей углерода свыше 0,3 %, а также чугуны, сплавы цветных металлов, латуни, бронзы, силумины и др.

- *Прокаливаемость* — это способность конструкционных материалов воспринимать закалку на определенную глубину. *Прокаливаемость* характеризуется глубиной закали, которая определяется на стандартных образцах по ГОСТ 5657—69. Испытанию подвергают цилиндрические образцы диаметром 25 мм, длиной 120 мм с заплечиками. Их закаливают с торца и через определенные размерные интервалы по методу Роквелла измеряют твердость.

Примеры *прокаливаемости* стали в зависимости от их химического состава представлены на *рис. III. 14.* (заштрихованные элементы показывают глубину *прокаливаемости*).

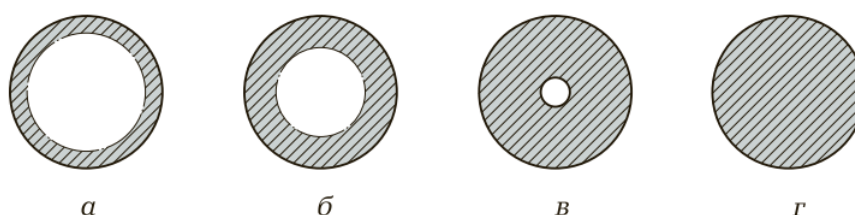


Рис. III. 14. Глубина *прокаливаемости* стали в зависимости от ее химического состава: а — углеродистые стали (низкая *прокаливаемость*); б — хромоникелевые стали (средняя *прокаливаемость*); в — легированные стали (высокая *прокаливаемость*); г — хромоникелевые стали с повышенным содержанием хрома (повышенная *прокаливаемость*)

Прокаливаемость зависит от химического состава конструкционного материала, температуры нагрева и способа охлаждения.

Например, углерод в конструкционных сталях, начиная от массовой доли 0,3% и выше, способствует увеличению *прокаливаемости*. Хром, кремний и марганец также способствуют увеличению *прокаливаемости*

легированных сталей. Высокую *прокаливаемость* имеют углеродистые инструментальные стали с массовой долей углерода 0,7 ... 1,3 %.

- *Незакаливаемость* — способность конструкционных материалов в процессе термической обработки не воспринимать закалку (например, углеродистые и другие стали с массовой долей углерода менее 0,3%).

Свойство *незакаливаемости* отдельных конструкционных материалов широко используется при сварке. Чем выше *незакаливаемость* металла соединяемых деталей и электродов, тем выше качество сварного соединения. Если отдельные стали обладают устойчивым свойством *незакаливаемости*, то, как бы их ни нагревали и ни охлаждали, детали из этих сталей закалку вообще не воспринимают.

Эксплуатационные свойства

Эксплуатационные, или служебные, свойства - это группа свойств, которые определяют долговечность и надежность работы изделий в процессе их эксплуатации. К ним относятся *износостойкость*, *циклическая вязкость*, *жаропрочность*, *жаростойкость*, *хладностойкость*, *антифрикционность*, *прирабатываемость* и др. Эти свойства определяются специальными испытаниями в зависимости от условий работы машин и механизмов. В основу *эксплуатационных свойств* положены физико-механические и химические свойства конструкционных материалов. Физико-химическая природа этих материалов определяет надежность и долговечность работы деталей и механизмов.

Износостойкость - способность конструкционных материалов сопротивляться абразивному изнашиванию трущихся поверхностей деталей и инструмента во время работы. Например, передняя поверхность режущих инструментов, по которой сходит стружка, при механической обработке (точении, сверлении, фрезеровании и т. д.) постоянно подвергается высокому трению, вследствие чего происходит изнашивание этой поверхности и режущей кромки резца.

Режущие элементы затупляются. Чем выше *износостойкость* материала резца, тем выше стойкость режущего инструмента, т. е. непосредственное машинное время работы данным инструментом. Требования высокой *износостойкости* предъявляются ко всем трущимся поверхностям деталей, инструменту и механизмам в процессе работы.

Поверхности зацепления зубчатых передач, фрикционных муфт, кулачковых механизмов, зеркало цилиндров двигателей внутреннего сгорания и т. д., как правило, должны иметь *высокую износостойкость*. *Высокая износостойкость* деталей, инструмента и механизмов достигается путем термической и химико-термической обработки.

Циклическая вязкость - это способность конструкционных материалов выдерживать динамические знакопеременные нагрузки не разрушаясь. Примером *высокой циклической вязкости* могут служить рессоры автомобиля, торсионы и пружины. Эти детали работают при высоких динамических нагрузках в сложных условиях и длительное время не разрушаются.

Постоянные толчки на стыках рельсов, неровностях автодорог и неравномерное движение поездов деформируют рессоры и пружины в прямом и обратном направлениях. Благодаря *высокой циклической вязкости* рессоры и пружины длительное время не разрушаются, что определяет их надежность.

Разновидностью *циклической вязкости* являются *демпферные свойства* некоторых конструкционных материалов. *Демпфирование* — способность гасить, рассеивать колебания и направленные нагрузки. Особенно высокими демпферными свойствами обладают серые литейные и ковкие чугуны, благодаря чему они широко применяются в производстве высоконагруженных деталей машин и конструкций (станины станков, кронштейны, кожухи и т. д.).

Жаропрочность - способность конструкционных материалов выдерживать высокие механические нагрузки в процессе работы при температурах, начиная от *0,3 температуры плавления и выше*.

Жаропрочность зависит от тугоплавкости химических компонентов конструкционных материалов. Многие детали современных двигателей, турбин, металлургических печей и силовых установок при высоких температурах несут большие нагрузки. При этом в конструкционных материалах ослабевают межатомные связи, уменьшаются упругость, твердость, вязкость, и детали постепенно разрушаются. *Углеродистые стали практически не имеют жаропрочности*. С добавлением в них алюминия, магния и титана в небольших объемах жаропрочность повышается до 300 ... 600 °С. С добавлением в сплав никеля и кобальта жаропрочность повышается до 700 ... 1000 °С.

Жаростойкость (*окалиностойкость*) - это способность металлов и сплавов противостоять образованию коррозии под действием температуры в среде воздуха, газа и пара. В практике принята эксплуатационная *жаростойкость* - стойкость при длительной работе деталей и конструкций при температуре 600 ... 650 °С.

Углеродистые стали и чугуны имеют низкую жаростойкость. Легированные стали, чугуны, сплавы, содержащие хром, никель, титан, вольфрам и ванадий, имеют жаростойкость 800 ... 1000 °С и выше.

Жаростойкость определяют глубиной коррозии (окалиной). Кроме того, стандартом устанавливается продолжительность работы деталей и конструкций в газовой среде (воздухе) при повышенной температуре. *Жаростойкость* металлов и сплавов определяют по специальной методике согласно ГОСТ 6130—71 [24].

Хладостойкость — свойство конструкционных материалов сохранять вязкость при отрицательных температурах от 0 до 269 °С. Воздействию низких температур подвергаются газо- и нефтепроводы, мосты, рельсы и другие сооружения, эксплуатируемые в северных районах, где температура

может достигать -60°C ; летательные аппараты, работающие при температурах от 0 до -183°C ; детали, узлы и механизмы холодильной и криогенной техники, эксплуатируемые в условиях температур до -269°C .

Хладноломкость (*хладностойкость*) - это свойство материала хрупко разрушаться при пониженных температурах и терять вязкость. Понижение температуры приводит к хрупкому разрушению конструкционных материалов. *Высокой хладноломкостью* обладают углеродистые конструкционные стали и чугуны. Алюминий, титан и их сплавы, никелевые стали обладают более *высокой хладностойкостью*. Для деталей и конструкций, работающих при отрицательных температурах, с целью уменьшения *хладноломкости* и получения *высокой хладностойкости* применяют специальные легированные стали и новые материалы - композиты.

Антифрикционность - способность конструкционных материалов образовывать низкое трение соприкасающихся (трущихся) поверхностей деталей в процессе их работы. Низкий коэффициент трения и высокое скольжение обеспечивают *антифрикционность* конструкционных материалов. В практике выпускаются специальные материалы, которые идут на изготовление узлов трения. Эти материалы называются *антифрикционными*. Они широко применяются для изготовления подшипников скольжения в современных машинах, механизмах и приборах. *Антифрикционные* материалы обладают устойчивостью к вибрации, бесшумностью в работе и прирабатываемостью. В качестве *антифрикционных* материалов широкое применение нашли *чугуны, бронзы и баббиты*. В целях устранения нагрева при трении и увеличения *антифрикционности* в механизмах используются смазывающие материалы.

Фрикционность — способность конструкционных материалов к образованию высокого трения соприкасающихся поверхностей деталей в процессе их работы. *Фрикционность* используется в тормозных устройствах

и механизмах и для передачи крутящего момента (фрикционные муфты, диски сцепления, тормозные барабаны и системы и т. д.).

Материалы, предназначенные для изготовления тормозных устройств, должны обладать высоким коэффициентом трения, минимальным износом, теплостойкостью, прирабатываемостью и высокой прочностью. В качестве *фрикционных* материалов применяются многокомпонентные металлические и неметаллические пластины, диски и накладки, спеченные или спрессованные с асбестом, графитом, металлической стружкой или проволокой.

Прирабатываемость - способность конструкционных материалов пластически деформироваться в процессе работы в узлах трения, увеличивать площадь контакта, снижать давление и температуру на трущихся поверхностях в узлах трения и сохранять граничную смазку.

Хорошая *прирабатываемость* обеспечивает надежную работу подшипников скольжения и качения при работе в паре с сырым или закаленным валом и других трущихся деталей и механизмов, повышая их долговечность. С целью обеспечения надежности и долговечности работы машин и механизмов после их изготовления проводится обкатка на холостом ходу. А после сдачи станка в эксплуатацию в первый период (рекомендуют для машин) осуществляют работу на малых оборотах или скоростях. В этих случаях происходит постепенная *прирабатываемость* всех узлов и агрегатов машин, станков и механизмов.

Эксплуатационные свойства обусловленные трением в технике получили название *триботехнических свойств* [25,26].

§ III.4. Особенности определения некоторых механических свойств металлов и сплавов

Типичная кривая *напряжение — деформация* для металла, подобного латуни (сплав меди с цинком), представлена на *рис. III. 15* [20].

Эта кривая может быть использована для оценки некоторых свойств материала.

Предел упругости и пластическая деформация

Важнейшей особенностью механического поведения материалов является соотношение между *напряжением* и *деформацией*. Из *рис. III. 15* следует, что у латуни прямолинейная зависимость между *напряжением* и *деформацией* не сохраняется на протяжении всей кривой.

Участок кривой, где зависимость между *напряжением* и *деформацией* является линейной, известна под названием области линейной упругости. В этой области наблюдается упругая деформация. При снятии напряжения в этой области, материал возвращается к своей первоначальной форме.

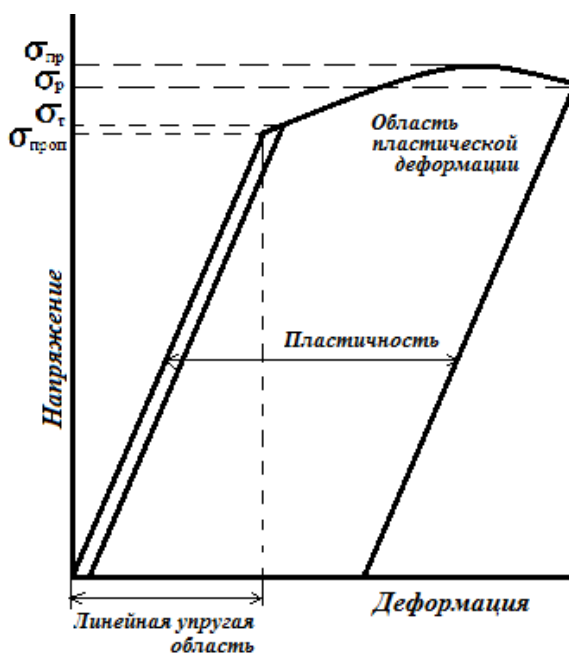


Рис. III. 15. Кривая напряжение-деформация для пластичного (ковкого) металла
($\sigma_{\text{пр}}$ - предел прочности при растяжении; $\sigma_{\text{р}}$ - прочность при разрушении; $\sigma_{\text{т}}$ - предел текучести; $\sigma_{\text{проп}}$ - предел пропорциональности)

Место, где кривая начала отклоняться от линейной, является точкой, в которой материал перешел через свой предел упругости, и при снятии напряжения останется деформированным, то есть не сохранит свою исходную форму. Это явление называется пластической деформацией, а область на графике - областью пластической деформации.

Ударная вязкость

Ударная вязкость – способность материала сопротивляться динамическим нагрузкам, определяется как отношение затраченной на излом работы A к площади его поперечного сечения S в месте надреза до испытания: $KC = A/S$.

Способность конструкционных материалов сопротивляться ударным нагрузкам называется *ударной вязкостью* (ударной прочностью). В процессе работы большинство деталей машин и механизмов испытывают ударные нагрузки, которые также называются динамическими нагрузками. Для определения условий работы конструкционных материалов при тех или иных динамических нагрузках существует метод испытания материалов на ударный изгиб при различных температурах (ГОСТ 9454—78) [27].

Для определения *ударной вязкости* материалов изготавливают специальные образцы с концентраторами напряжений, имеющие форму квадратных брусков с надрезом. Ударная вязкость (прочность) определяется на специальном приборе, называемом маятниковым копром (*рис. III. 16*). Свободно падающий маятник копра ударяет по образцу со стороны, противоположной надрезу. При этом фиксируется работа, затраченная на излом образца.

Форма надреза может быть округлой, V-образной и в виде трещины, которые испытывают на маятниковых копрах. Образцы изготавливают с U -, V -, T - образными концентраторами. Образцы устанавливают на опоры маятникового копра посередине концентраторов напряжений. Далее разрушают образец. В результате разрушения определяют полную работу K , затраченную на разрушение образца при ударе (работа удара), или *ударную вязкость* KC . Таким образом, под *ударной вязкостью* понимают работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора. Ударную вязкость обозначают KCU , KCV или KCT в зависимости от вида концентратора (U -образный концентратор с радиусом 1 мм; V -образный концентратор с радиусом $0,25$ мм; T — трещина усталости,

образованная в основании надреза). Ударная вязкость KC , Дж/м² (кгс·м/см²), вычисляется по формуле

$$KC = K/S_0, \quad (III.12)$$

где K - работа удара, Дж/м² (кгс·м/см²); S_0 — начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, м² (см²). При определении ударной вязкости, отличной от нормальной температуры, указывают цифровой индекс, соответствующий температуре испытания.

Например, $KCU20$ означает, что испытание проведено при температуре 20°C.

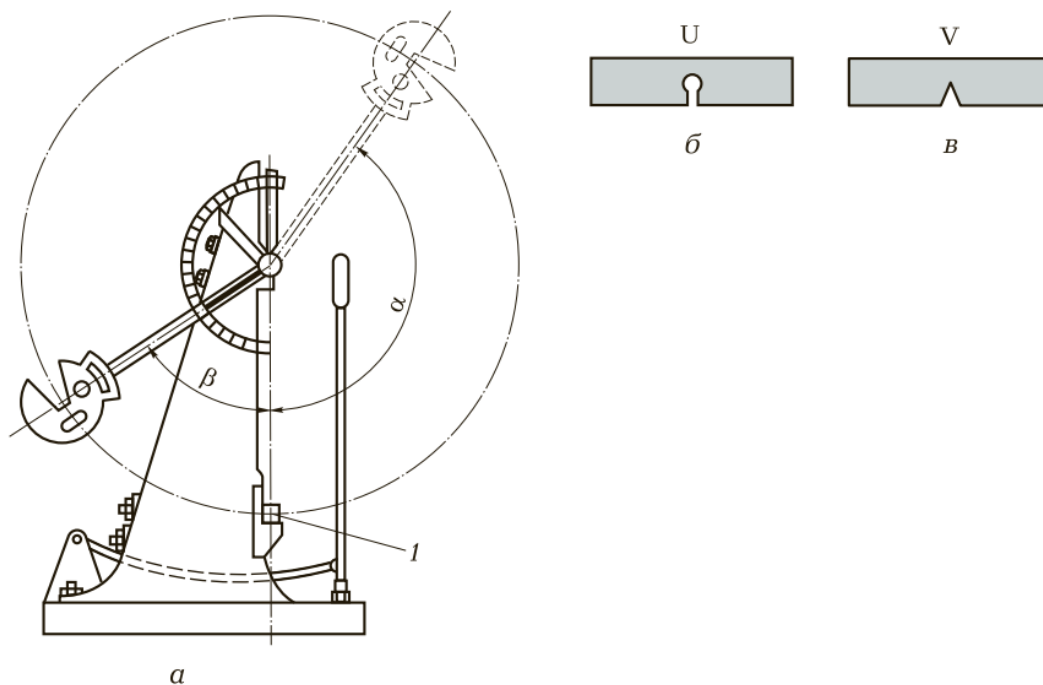


Рис. III. 16. Маятниковый копер:

а — общий вид прибора; *б* — U-образный концентратор напряжения; *в* — V-образный концентратор напряжения; *1* — испытываемая деталь; α — угол подъема маятника; β — угол отклонения маятника после разрушения образца

Определение ударной вязкости особенно важно для металлических материалов, работающих при отрицательных температурах и проявляющих склонность к хладноломкости.

Чем ниже температура, при которой вязкое разрушение материала переходит в хрупкое, и чем больше запас его вязкости, тем он надежнее. Примеры ударной вязкости некоторых конструкционных материалов приведены в табл. III.4.

Таблица III.4

Таблица 4. Ударная вязкость некоторых конструкционных материалов			
Марка стали	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ² , при 20 °С	Марка стали	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ² , при 20 °С
Ст2кп	24 ... 64	15	120
Ст5сп	71	45	76 ... 80
Ст08	235	15Х	111 ... 156

Примечание. Ударная вязкость образцов приведена в нормализованном состоянии.

Испытания на ударную вязкость - один из наиболее старых и широко применяемых методов динамических испытаний. Испытания, как правило, проводят на специальных машинах - маятниковых копрах.

Образец стандартных размеров в форме параллелепипеда сечением $10 \times 10 \text{ мм}^2$ с надрезом посередине свободно устанавливают концами на двух опорах. Маятник копра отводят на определенный угол; свободно падая он ударяет образец посередине между опорами. Образец разрушается, а маятник по инерции поднимается на некоторый угол по другую сторону от нулевой линии.

Ударная вязкость определяется работой, расходуемой на ударный излом образца, отнесенной к рабочей площади его поперечного сечения. Работу затраченную на разрушение образца, определяют по углу подъема маятника до и после удара.

§ III.5. Упругая и пластическая деформации, наклеп и рекристаллизация

Любая деформация может осуществляться в твердых телах путем относительного смещения атомов. В твердых телах различают упругую деформацию (исчезающую после устранения воздействия, вызвавшего ее) и пластическую (оставшуюся после удаления нагрузки).

Упругая деформация для твердых тел обычно мала и пропорциональна приложенному напряжению и величина смещения атомов из положения равновесия не превышает расстояния между соседними атомами [28,29].

Смещение атомов из положения равновесия является реакцией на действие внешних сил на все твердое тело или его отдельную часть. В любых условиях нагружения действие внешних сил на тело уравнивается противодействием межатомных, стремящихся вернуть атомы в положение минимума потенциальной энергии.

Однако увеличение потенциальной энергии тела за счет смещения атомов из положения равновесия не происходит безгранично. При достижении определенного предела потенциальной энергии атомы получают возможность смещаться на расстояния большие, чем межатомные расстояния ненагруженного твердого тела. В этом случае после снятия внешних усилий атомы не возвращаются в свои исходные положения равновесия, а занимают новые положения устойчивого равновесия. Сумма смещений атомов в новые положения равновесия создает *пластическую деформацию* или остаточное изменение формы и размеров твердого тела в результате действия внешних сил [28,30]. Под нагрузкой атомы всегда смещены из положений равновесия, так как действие внешних сил уравнивается действием внутренних сил, вызванных смещением атомов из положений равновесия. Отсюда следует, что в условиях *пластического деформирования* общая (полная) деформация содержит как пластическую составляющую, так и упругую, исчезающую после снятия деформирующих сил. Основным механизмом *пластической деформации* является движение дислокаций (*dislocatio* – смещение, перемещение). Осуществляется *пластическая деформация* скольжением и двойникованием (рис. III. 18).

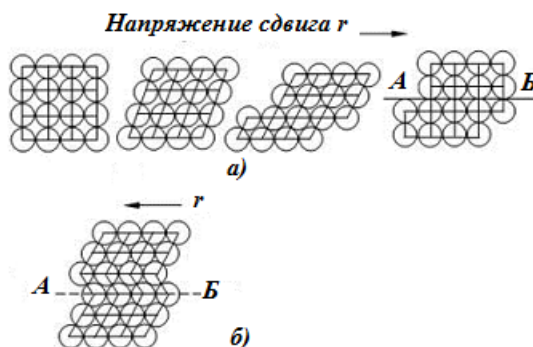


Рис. III. 18. Схема пластической деформации скольжением (а) и двойникованием (б)

Как следует из диаграмм растяжения, при деформации сталей при комнатной температуре предел текучести увеличивается с ростом деформации, то есть материал в этих условиях упрочняется.

Упрочнение – изменение структуры и свойств металлического материала, вызванное *пластической деформацией*.

Наибольшую сопротивляемость *пластическому деформированию* должен оказывать металл с очень малой плотностью дислокаций r . По мере увеличения плотности дислокаций r сопротивление пластическому деформированию уменьшается (рис. III. 19).

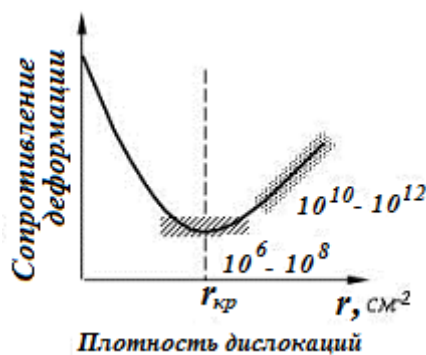


Рис. III. 19. Зависимость сопротивления деформированию от плотности дислокаций

Это происходит до достижения некоторого критического значения плотности дислокаций $r_{кр}$. когда начинается взаимодействие силовых полей, окружающих дислокации, что и вызывает увеличение сопротивления пластическому деформированию.

Следовательно, увеличение сопротивления пластическому деформированию можно получить двумя путями: *наклепом металла*, а именно, прямым повышением плотности дислокаций, или доведением плотности дислокаций до очень малого значения, т.е. создание металлов и сплавов с бездефектной структурой [31,32].

Первый способ упрочнение металла при холодной пластической деформации и называется *наклепом*. В результате наклепа прочность (σ_B , $\sigma_{0,2}$, твердость и др.) повышается, а пластичность и ударная вязкость (δ , ψ , KCU) – уменьшаются. Упрочнение возникает вследствие увеличения числа дефектов кристаллической структуры, которые затрудняют движение дислокаций, и,

следовательно, повышают сопротивление деформации и уменьшают пластичность.

Наклеп является одним из важнейших способов изменения свойств, особенно для сплавов, не упрочняющихся термической обработкой, и для металлов, обладающих пластичностью. Методы упрочняющего воздействия можно разделить на поверхностные (обкатка роликами, дробеструйная обработка) и сквозные (прокатка листов, волочение проволоки). Обработка металлов резанием также приводит к *наклепу* и изменению структуры в тонком поверхностном слое, что необходимо учитывать при последующей эксплуатации изделий.

Таким образом, пластические деформации вызывают повышение плотности дислокаций, искажение кристаллической решетки и приводят к увеличению напряжения, при котором возможны дальнейшие деформации.

Второй способ – создание металлов и сплавов с бездефектной структурой, – является более прогрессивным. В настоящее время получают кристаллы небольших размеров (длиной 2–10 мм и толщиной 0,5–2,0 мкм), так называемые «усы», практически без дислокаций, с прочностью близкой к теоретической. Такие кристаллы нашли свое применение для армирования волокнистых композиционных материалов, в микроэлектронике и т. д.

При деформировании округлые зерна заменяются вытянутыми в направлении деформации, образуется так называемая *текстура* (*textura* – ткань, связь, строение) – анизотропная поликристаллическая или аморфная среда, состоящая из кристаллов или молекул с преимущественной ориентировкой. Текстуры могут быть осевыми – с предпочтительной ориентировкой элементов текстуры относительно одного особого направления, плоскими – с ориентировкой относительно особой плоскости и полными – при наличии особой плоскости и особого в ней направления (*рис. III.20*). Текстура создает анизотропию свойств.

Упрочненный металл обладает повышенным запасом внутренней энергии, т. е. находится в неравновесном состоянии.

Для приведения металла в равновесное состояние его необходимо нагреть. При нагреве *наклепанного металла* в нем протекают следующие процессы:

- частичное восстановление структурного совершенства в результате уменьшения точечных дефектов за счет увеличения подвижности атомов (избыточные вакансии и межузельные атомы взаимодействуют между собой, а также поглощаются дислокациями при перераспределении последних при нагреве) и снижение внутренних напряжений (процесс *возврата*);

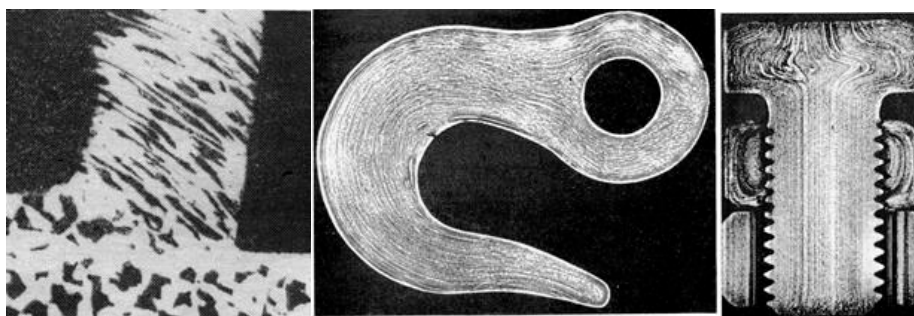


Рис. III. 20. Образование текстуры:

а) в стружке, б) в соединительном крюке железнодорожного вагона, полученного ковкой из куска катаного круга из среднеуглеродистой стали; в) в головке болта, полученной осадкой, в основной части, полученной вытяжкой, в гайках, из которых одна была выточена из пруткового проката, а другая – откована

- уменьшение плотности дислокаций за счет аннигиляции противоположных по знаку дислокаций и образование субзерен (полигонов), свободных от линейных несовершенств за счет выстраивания дислокационных стенок (процесс *полигонизации*);

- зарождение и рост новых равноосных зерен вместо ориентированной волокнистой структуры деформированного металла (процесс *рекристаллизации*) (рис. III.20,а).

Процесс рекристаллизации начинается с образования зародышей новых зерен и заканчивается полным замещением деформированного зерна мелкими равноосными зернами (*первичная рекристаллизация*) (рис. III.20,б; рис. III.20,в), в результате чего полностью снимается наклеп, созданный при пластическом деформировании (снижаются прочность и твердость металла и увеличивается его пластичность), металл приобретает равновесную

структуру с минимальным количеством дефектов кристаллического строения.

Плотность дислокаций после рекристаллизации снижается с 10^{10} – 10^{12} см^{-2} до 10^6 – 10^8 см^{-2} .

При дальнейшем повышении температуры происходит увеличение размеров наиболее крупных зерен за счет присоединения мелких. С повышением температуры число крупных зерен постепенно растет, пока все мелкие зерна не окажутся присоединенными к крупным – процесс *вторичной (собирательной) рекристаллизации* (рис. III. 21, 22).

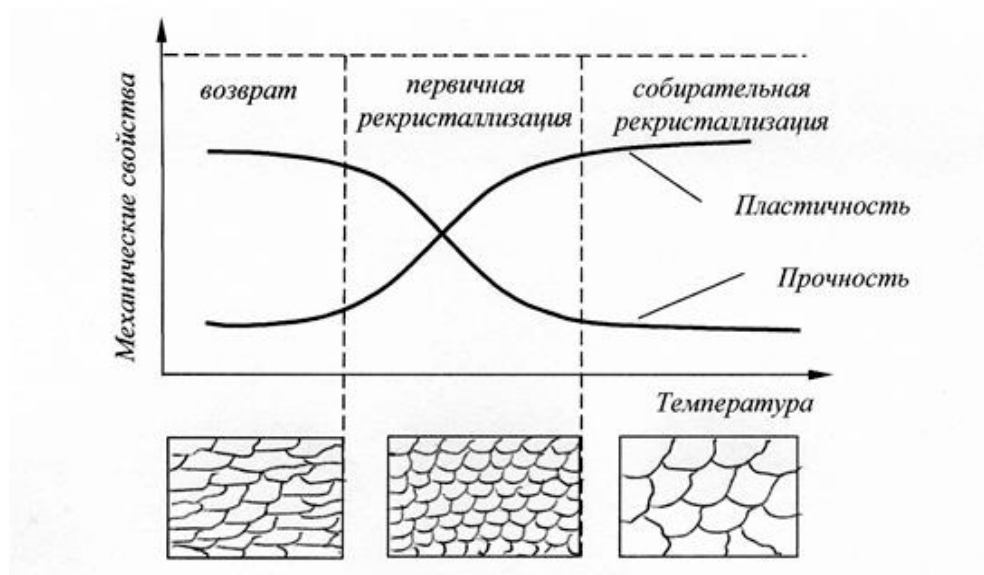


Рис. III. 21. Изменение прочности, пластичности и зернистого строения в процессе нагрева деформированного металла

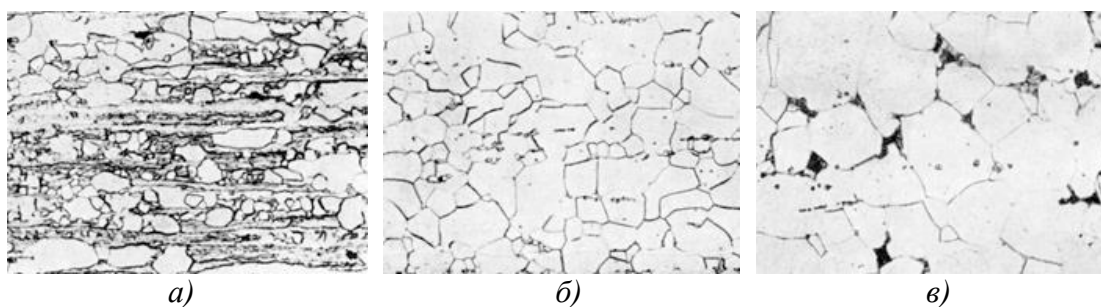


Рис. III. 22. Рекристаллизация холоднодеформированной стали:

а) зарождение новых мелких недеформированных зерен; б) конец первичной рекристаллизации; в) вторичная рекристаллизация

Температуру начала рекристаллизации, при которой протекает рекристаллизация, происходит разупрочнение холоднодеформированного

металла и восстановление его пластичности называют *температурным порогом рекристаллизации* $T_{ПР}$.

Эта температура не является постоянной физической величиной, как, например, температура плавления. Для данного металла (сплава) она зависит от длительности нагрева, степени предварительной деформации, величины зерна до деформации и т. д. Температурный порог рекристаллизации снижается с повышением степени деформации, увеличении длительности нагрева или уменьшении величины зерна до деформации.

Температура начала рекристаллизации $T_{ПР}$ для технически чистых металлов составляет примерно $0,4T_{ПЛ}$, для чистых металлов снижается до $(0,1-0,2)T_{ПЛ}$, а для сплавов возрастает до $(0,5-0,6)T_{ПЛ}$.

ГЛАВА IV

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Основоположниками металлографии являются П.П. Аносов (1799-1851 гг.) и Д.К. Чернов (1939-1921 гг.). Первые металлографические исследования железа и его сплавов были проведены Павлом Петровичем Аносовым. Значительно позднее, в 60-х годах XIX в. Видманштеттен и Сорби применили микроскоп для исследования строения железа метеоритов.

Именно П.П. Аносову принадлежит приоритет в создании легированных сталей. Он установил существование связи между строением и свойствами стали.

Велико значение работ Дмитрия Константиновича Чернова. Им были заложены основы научного металловедения. В 1868 г. Д.К. Чернов изложил свое представление о механизме кристаллизации стали.

Он открыл зависимость свойств стали от температуры нагрева и охлаждения. Д.К. Чернов впервые указал на превращения, протекаемые в стали, при определенных температурах, сопровождающиеся тепловым эффектом. Он высказал предположение, что данные превращения являются аллотропическими. Графически изображенная Д.К. Черновым зависимость температуры этих превращений и плавления стали от содержания в ней углерода, найденная по цветам каления, являлась прототипом диаграммы равновесия железо-углерод. Он также показал значение времени выдерживания стали при той или иной температуре, тем самым заложив основы изучения кинетики фазовых превращений и формирования структуры.

Позднее французский ученый Ф. Осмонд с помощью пирометра указал температуры, тем самым определил критические точки, при которых происходят значительные изменения свойств стали. Он описал изменения микроструктуры при переходе через указанные точки, дал названия основным структурам железоуглеродистых сплавов, которые используются и сегодня.

В 1873-1876 гг. Гиббс, основываясь на законах термодинамики, изложил законы фазового равновесия (правило фаз). Однако его работы нашли дальнейшее применение лишь через десять лет из-за малодоступной формы изложения. В 1893 г., исходя из законов Гиббса о минимуме термодинамического потенциала, ванн Рейн ванн Алькемаде показал, что не прибегая дополнительно ни к каким другим допущениям, можно вывести все типовые диаграммы равновесия. В 1897 г. английский ученый Робертс-Аустен на основе своих исследований и работ Д.К. Чернова впервые построил диаграмму фазового равновесия железо-углерод.

Именно широкое использование металлов и сплавов в промышленности привело к дальнейшему быстрому развитию металловедения.

В начале XX в. Н.С. Курнаков для исследования металлов применил методы физико-химического анализа, основы которого были заложены великим русским химиком Д.И. Менделеевым в 60-70-х годах XIX века. Н.С. Курнаков вместе со своими учениками провел исследования многих сплавов, построил диаграммы состояния этих сплавов, а также установил зависимости между их составом, структурой и свойствами (правило Курнакова). Были обнаружены ранее неизвестные фазы в металлических сплавах.

Необходимо отметить, что большое значение в создании теории диаграмм равновесия имели работы Г. Таммана. В результате появилось учение о фазовом равновесии различных металлических систем, что и составляет значительную часть металлографии. Кроме понимания фазового равновесия металлических систем необходимы представления о структуре металлов и сплавов в широком смысле этого слова.

Неоценимый вклад в изучение кристаллического строения металлов, сплавов и различных фаз методами рентгеновского анализа внес Г.В. Вульф (1862-1925 гг.). В 1912 г. немецкий физик Лауэ (1879-1960 гг.) показал, что атомы регулярно заполняют пространство, образуя пространственную дифракционную решетку, и волновую природу рентгеновских лучей. После чего стало возможным определение атомного строения фаз. Изучение атомного строения металлических фаз занимались советские рентгенологи Н.В. Агеев, Г.С. Жданов, С.Т. Конобеевский, Г.В. Курдюмов и зарубежные – Юм-Розери, Тейлор, Делингер, Кёстен и другие.

Развитие науки и техники позволило создать большое количество методов и средств для изучения структуры и свойств металлов и сплавов. С точки зрения реализации современных подходов к исследованию структуры металлов и сплавов принято различать: *исследования* макроструктуры, микроструктуры и тонкой структуры. В этой связи и выделяют три метода их исследования:

- макроанализ;
- микроанализ;

- рентгеноструктурный анализ;
- электронная микроскопия;
- дефектоскопия металлов и сплавов.

Металлы — это непрозрачные вещества и их строение изучают в изломе или специально приготовленных образцах (макрошлифах). Образец вырезают из определённого места, в определённой плоскости в зависимости от того, что подвергают исследованию (литьё, поковку, штамповку, прокат, сварную или термически обработанную деталь) и что необходимо выявить и изучить (первичную кристаллизацию, неоднородность структуры, дефекты, нарушающие сплошность металла). Поэтому, образцы вырезают из одного или нескольких мест слитка (или заготовки, или детали) как в продольном, так и в поперечном направлениях. Поверхность образца (темплета) выравнивают на наждачном круге, а затем шлифуют. После шлифования темплет травят в специальных реактивах, которые по-разному растворяют структурные составляющие и растравливают дефекты.

Исследования металлов проводятся с целью, определения физических свойств, изучения внутреннего строения металлов, их механических свойств, оценки технологических свойств.

Физические свойства (плотность, теплопроводность, электрические, магнитные, оптические и др.) определяют обычными физическими методами. Исследование физических свойств служит основой изучения внутреннего строения металлов и сплавов, так как фазовый состав и происходящие превращения одной фазы в другую четко отражаются на физических свойствах металлов. Изучая физические свойства, можно судить о происходящих в металле превращениях.

Оценка технологических свойств производится с помощью специальных технологических проб, которые разрабатываются для решения узкой технологической задачи. При этом из-за большой сложности изучаемого явления приходится пользоваться измерениями с невысокой точностью. Примером подобных проб могут служить пробы на отбел

чугунов, на прокаливаемость сталей, на жидкотекучесть расплавленного металла, на осаживание и др. Ниже более подробно будет описана технологическая проба на излом, очень широко используемая при оценке особенностей структуры металлов.

Исследования структуры металлов и сплавов, их фазового состава и его изменений под действием температуры и вводимых добавок, исследование механических свойств металлов и сплавов осуществляются с помощью большого числа разнообразных методов анализа, из которых здесь будут рассмотрены лишь наиболее употребительные.

Термический анализ основан на том, что при фазовых превращениях в металлах и сплавах происходит выделение или поглощение тепла. Если проследить за изменением температуры в образце металла при нагревании или охлаждении, то в момент начала фазового превращения плавный ход температуры нарушается. На кривой, показывающей зависимость температуры от времени, появляются перегибы, так как изменение температуры замедляется от выделения или поглощения тепла. При определенных условиях замедление изменения температуры может быть таким, что температура некоторое время будет сохраняться постоянной, и на температурной кривой появится горизонтальный участок - площадка.

Измерение температуры при термическом анализе металлов производится, как правило, с помощью термопар. Термопару изготавливают из двух проволок разных металлов (термоэлектродных сплавов), концы которых сваривают, образуя горячий спай. Два других конца присоединяют к гальванометру и они являются холодным спаем. При нагреве горячего спае термопары в ней возникает термоэлектродвижущая сила, пропорциональная разности температур горячего и холодного спаев. Этим способом удастся зафиксировать лишь значительные тепловые эффекты. Для повышения чувствительности термического анализа обычно наряду с простой термопарой, показывающей температуру образца, пользуются еще дифференциальной термопарой, которая показывает разницу температур

между образцом и специальным эталоном. Дифференциальную термопару изготавливают из двух одинаковых простых термопар путем соединения их двух холодных одноименных концов. Два других одноименных конца подсоединяют к очень чувствительному гальванометру. Горячий спай одной термопары помещают в образец, а другой - в эталон, которым служит вещество, не имеющее превращений в данном интервале температур. При одинаковой температуре образца и эталона результирующая термо э. д. с. в дифференциальной термопаре равна нулю. При малейшей разнице в температурах образца и эталона в дифференциальной термопаре возникает термо э. д. с., фиксируемая гальванометром.

Проводя одновременно замер или запись показаний простой и дифференциальной термопар, получают абсолютные значения температуры по показаниям простой термопары и обнаруживают даже незначительные тепловые эффекты в образце по показаниям дифференциальной термопары. Термический анализ используют для выявления превращений в жидких и твердых металлах. При автоматической записи температуры термический анализ называют термографией.

Дилатометрический анализ используется для изучения превращений в твердых материалах. Он основан на том, что при фазовых превращениях происходит изменение объема. На специальном приборе - дилатометре - производится запись кривых в координатах линейный размер - температура или разность линейных размеров образца и эталона - температура. В момент превращения в образце на дилатометрической кривой наблюдаются перегибы. Обычно одновременно записывается температура образца, так что происшедшее изменение размеров можно привязать к температуре.

Металлографический анализ состоит в изучении строения металла с помощью так называемых шлифов. Металлографический шлиф готовят тщательной шлифовкой поверхности образца. Шлифовку производят в несколько стадий, постепенно уменьшая крупность частиц абразивного материала. Абразивным материалом служат порошки алмаза, корунда,

окислов хрома, алюминия и т. д. Обычно пользуются шкурками с нанесенным слоем абразивного материала.

Рассматривая шлиф невооруженным глазом, визуальнo изучают *макроструктуру металла*, т.е. исследование структуры невооружённым глазом или при небольших увеличениях с помощью лупы (макс. до 30 раз). Макроанализ позволяет выявить:

- вид излома (хрупкий, вязкий);
- величину, форму и расположение зерен и дендритов литого металла;
- дефекты в слитках и отливках (усадочные раковины, газовые пузыри, трещины);
- дефекты, нарушающие сплошность металла (усадочную пористость, газовые пузыри, раковины, трещины);
- химическую неоднородность металла, вызванную процессами кристаллизации или созданную термической и химико-термической обработкой;
- расположение волокон в кованных и штампованных заготовках;
- трещины, возникающие при обработке давлением или термической обработке, дефекты в сварных швах.

Изучая нетравленный шлиф, определяют наличие дефектов (пор, трещин) и неметаллических включений. Подвергнув шлиф действию специального реактива (травителя), можно выявить форму и расположение отдельных кристаллов - зерен. Травителями служат водные или спиртовые растворы кислот, щелочей, солей. Кристаллы, выходящие на поверхность шлифа различными плоскостями, в различной степени взаимодействуют с травителем, поэтому после травления они по-разному отражают свет. В результате одни зерна на поверхности шлифа кажутся светлыми, другие - темными.

Иногда травитель действует только на границы между зернами. В этом случае границы между зернами выглядят тонкими темными линиями.

Нередко особенности макроструктуры металла легко и наглядно удается визуально выявить не на шлифах, а в изломе. Присутствие в металле хрупких фазовых составляющих, очень часто имеющих форму пластин, наиболее просто устанавливается с помощью пробы на излом. На поверхности излома места разрушения по хрупким пластинам выглядят как отдельные гладкие участки. Кроме того, вид поверхности пробы на излом дает представление вообще о характере разрушения - произошло ли оно по границам зерен (межкристаллитный излом) или по телу зерна (транскристаллитный излом). По виду излома можно сказать, имеет ли металл крупнокристаллическое или мелкокристаллическое строение, было ли большим или малым предшествующее пластическое деформирование металла. Наконец, с помощью пробы на излом удастся качественно оценить способность металла к пластическому деформированию: если разрушению предшествует значительная пластическая деформация, то излом получается волокнистым. В этом случае об исходной структуре металла судить трудно. Исследование металлов путем изучения поверхности изломов называют *фрактографией*.

Изучение шлифов или изломов невооруженным глазом возможно, если кристаллические зерна не слишком малы, примерно не менее $0,5 \div 1$ мм.

§ IV.1. Металлография сплавов на основе железа

IV.1.1. Металлографические методы выявления структуры металлов и сплавов

Изучение микроструктуры ведут на специально подготовленных образцах, которые называют микрошлифами. Чтобы получить достоверное представление о структуре исследуемого материала, необходимо правильно определить место вырезки образцов.

В случаях, когда микроструктурный анализ предусмотрен стандартом, размеры микрошлифов и способы их отбора стандартизованы (ГОСТ 1778-70) [1,2]. В остальных случаях место вырезки образца определяется задачами исследования.

При осуществлении контроля микроструктуры крупного объекта, от него сначала отбирают *пробу*.

Проба – часть металлопродукции, предназначенная для изготовления заготовок образцов. Далее из пробы вырезают заготовку (*тёмплет*).

Заготовка – часть пробы, обработанная или необработанная механически, подвергнутая, в случае необходимости, термической обработке, и предназначенная для изготовления образцов.

Образцы – часть пробы или заготовки определенного размера, обработанная или необработанная механически и доведенная до состояния, необходимого для конкретного испытания.

Пробы, заготовки и образцы отбирают из наиболее характерных зон металлопродукции. В литом металле различия в структуре вызваны различными условиями отвода тепла как по сечению, так и по высоте отливки; в деформированном металле – различной степенью деформации внешних и внутренних слоев металла.

Для исследования металлопродукции с неоднородной по сечению структурой используют только поперечный шлиф; его плоскость должна быть перпендикулярна оси изделия. При неоднородности структуры по высоте и длине детали вырезают несколько образцов из различных наиболее характерных зон.

Для изделий, у которых один размер (толщина) значительно меньше остальных (длины и ширины), например, отливок типа плит, структуру изучают на шлифе, плоскость которого перпендикулярна наибольшей плоскости изделия.

Место вырезки образцов и их количество определяется целями и задачами исследования. Пробы, заготовки и образцы можно вырезать любым

способом (на металлорежущих станках, гильотинных ножницах и т.п.), обеспечивающим сохранение структуры металла.

При ручной обработке для удобства изготовления микрошлифов из образцов, размеры которых меньше общепринятых, используют специальные приспособления – зажимы (державки). Образцы также можно запрессовывать или заливать различными твердеющими массами. При отсутствии соответствующего оборудования их заливают в оправки-кольца.

IV.1.1.1. Методика и особенности подготовки микрошлифов для проведения микроструктурного анализа металлов и сплавов

Методика подготовки микрошлифа состоит из нескольких этапов: зачистка, шлифование, полирование и травление поверхности образца (*рис. IV.1*) [3,4,5,6].

Самым трудоемким процессом при подготовке микрошлифа являются процессы шлифования и полирования.



Рис. IV. 1. Образец для металлографических исследований

Плоскость образца шлифуют и полируют либо в ручную, либо автоматически на специальных установках (*рис. IV.2, 3*).

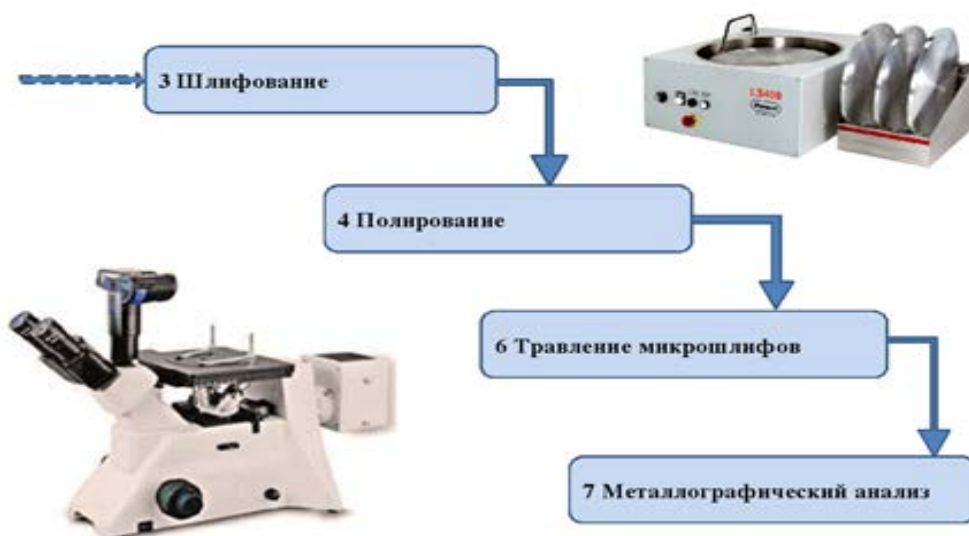


Рис. IV. 2. Этапы приготовления образцов для металлографии



Рис. IV. 3. Станок для шлифования поверхности образца с горизонтально вращающимся плоским металлическим кругом

Подготовка микрошлифа (шлифа) начинается с зачистки поверхности. Для этого у образца опиливается на плоскость одна из сторон. Зачистку поверхности лучше всего производить на наждачном круге. Затем начинается этап шлифования образца. Шлифуют образцы на специальных станках с горизонтально вращающимся плоским металлическим кругом, на котором закрепляют наждачную бумагу различной зернистости (рис. IV.3).

Изготовление микрошлифов сводится к последовательному выполнению следующих операций:

- *грубая шлифовка*; при этом производят выравнивание поверхности среза и излома на абразивных кругах или грубой наждачной бумагой;

- *тонкая шлифовка;*
- *полировка.*

После *грубой шлифовки* образец очищают от абразива и частиц металла и производят шлифовку на специальных шлифовальных станках или в ручную на шлифовальной бумаге различной зернистости.

Ручная *шлифовка* выполняется на шлифовальной бумаге, помещаемой на стекле для создания ровной твердой поверхности. Для *шлифования* необходимо подготовить влагостойкую наждачную бумагу с различным размером зерна абразива. Сначала *шлифуют* на грубых (крупнозернистых) с абразивным зерном (*P240* - размер зерна составляет 50..63 мкм, до *P600* - размер зерна 20..28 мкм) абразивных бумагах до полного удаления неровностей, наследованных от вырезки и зачистки образца.

При механическом способе *полировку* производят на полировальном станке. При этом круг покрывают мягкой тканью: сукном, фетром и т.п. чем мягче *полируемый материал*, тем строение применяемой ткани должно быть тоньше. При *полировке* ткань равномерно смачивается *полировочной жидкостью*, как правило, смесь абразивного материала с водой.

Далее переходят к более мелкозернистым абразивным бумагам для уменьшения шероховатости поверхности и *заканчивают шлифование* на микронных бумагах (*P1500*). *Шлифуют* до тех пор, пока не исчезнут риски от предыдущей обработки, после этого образец очищают от наждачной пыли, поворачивают на $90^{\circ}C$ и выполняют *шлифовку* на более тонкой *шлифовальной бумаге*.

При переходе с одного номера бумаги на другой следует поворачивать образец под углом 90° к направлению перемещения его на предыдущей бумаге. Очень важно *при шлифовании* постоянно смачивать абразивную бумагу и образец водой для охлаждения поверхности образца, иначе он очень быстро перегревается. Это приводит к появлению окалины на поверхности шлифа. Чтобы *шлиф* случайно не перегреть в процессе обработки, его прижимают к абразивной бумаге слегка, без усилия. Необходимо помнить,

что окружная скорость вращения диска зависит от расстояния от центра вращения диска, и тем она больше чем ближе к краю диска. Поэтому чем дальше от центра вращения диска находится *шлифуемый (полируемый)* образец, тем интенсивней происходит *шлифование поверхности* и соответственно её нагрев.

Переходить к *полированию* следует только после полного удаления рисок (*царапин*), созданных на предыдущей операции (*рис. IV.4*).

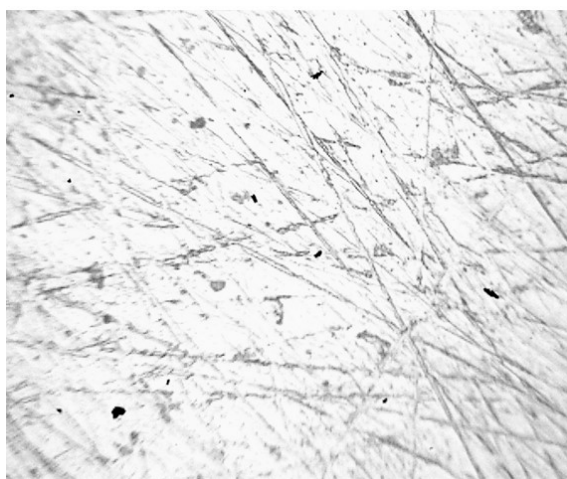


Рис. IV.4. Некачественно отполированная поверхность образца из стали 30 с микро царапинами (шлиф не травленный, увеличение $\times 400$)

Для *полирования* образца необходимо шлифовальную бумагу, установленную на металлическом диске заменить на фетр, войлок или тонкое сукно.

Как показывает практика, ткань необходимо приклеивать на картон и только после этого устанавливать на круг шлифовальной машины, иначе в процессе полирования ткань начинает топорщиться и выезжать из-под кольца крепления металлического диска.

Далее на фетр, войлок или тонкое сукно наносится абразивная паста. Очень хорошо для *полирования* металлов подходят автомобильные пасты различной зернистости, предназначенные для *полирования* кузова автомобилей. Для *полирования* необходимо подготовить несколько абразивных паст с различной зернистостью. На *финишном этапе полирования* должна быть применена неабразивная паста.

Как понять, что шлиф отполирован достаточно хорошо и процесс полирования можно считать законченным?

Во-первых, на поверхности шлифа должны быть удалены все риски и микроцарапины (рис. IV.5), а поверхность образца визуально должна стать зеркальной.

Во-вторых, признаком хорошо отполированной поверхности является отсутствие налипания полировальной пасты на поверхность в процессе полирования. Если поверхность шлифа хорошо отполирована, то полировальная паста на ней не задерживается и на поверхности шлифа не остаётся следов пасты.

Не рекомендуется для *полирования* использовать пасту ГОИ (окись хрома (Cr_2O_3)). Дело в том, что данная паста содержит зерна абразива различной дисперсности (т.е. она не однородна). Поэтому в ее структуре встречаются более крупные абразивные частицы, которые оставляют на поверхности шлифа царапины.

К *шлифованию* и *полированию* образца следует подойти ответственно, набраться терпения и постараться получить поверхность микрошлифа высокого качества. Иначе все поверхностные дефекты, не ликвидированные в процессе полирования (*царапины*, *риски*) будут отчетливо видны на *микрошлифе* при исследовании образца на металлографическом микроскопе и не позволят получить качественное изображение структуры.

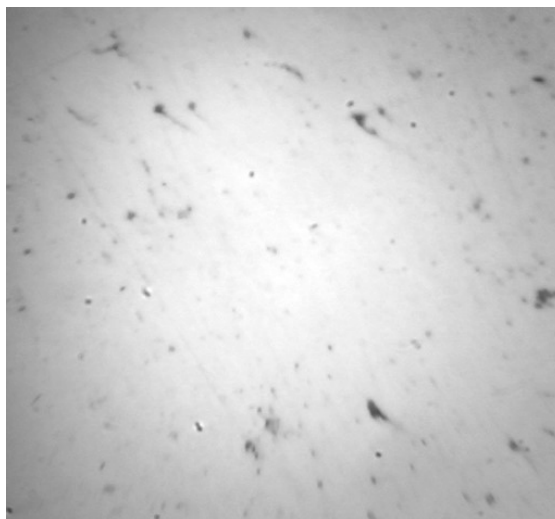


Рис. IV.5. Хорошо отполированная поверхность образца из стали 30
(шлиф не травленый, увеличение $\times 400$)

После *тонкой шлифовки и полирования* для удаления частиц абразива и металла образец промывают под струей воды и подвергают *электролитической полировке*.

Электролитическая полировка заключается в выравнивании поверхности, подвергаемой анодному растворению. Такой *вид полировки* позволяет подготовить шлиф без наклепа, однако возможно избирательное растворение отдельных фаз. При этом происходит выравнивание поверхности в результате анодного или химического растворения неровностей. Подготовленные таким образом образцы называются *микрошлифами*.

Травление микрошлифов приводит к выявлению *микроструктуры образца*. При этом в однофазных сплавах выявляются *границы между зернами*. Более интенсивное воздействие травителя может привести к выявлению двойников, линий сдвига, химической неоднородности внутри зерна (*дендритной ликвации*). В сплавах, содержащих две или более фаз, с помощью травления в первую очередь выявляются границы между фазами. Обычно стремятся так подобрать травитель, чтобы при его воздействии фазы окрашивались в разный цвет. Нередко микрошлифы изучают в нетравленном виде. Это позволяет выявить микродефекты и мелкие включения неметаллических фаз.

Если *металлографическое исследование* не проводится сразу после приготовления *шлифа*, то *поверхность шлифа* следует предохранить от возможного окисления. Такие *шлифы* особенно тщательно промывают спиртом и просушивают. Затем *шлифы* помещают в специальные сосуды (*эксикаторы*).

Более тонкие подробности кристаллического строения металлов изучают, рассматривая *шлифы* под микроскопом, что связано с наиболее тщательной подготовкой поверхности. Для выявления микроструктуры

изучаемого образца отполированную поверхность *микрошлифа* необходимо подвергнуть травлению различными химическими составами (*травителями*).

Травитель подбирается в зависимости от химического состава сплава, из которого изготовлен *микрошлиф*. Например, для *травления* *шлифов*, подготовленных из *чугуна* или *углеродистой стали* хорошо подходит 2÷4% спиртовой раствор азотной кислоты, а для *травления меди* — раствор, приготовленный на основе хлорного железа.

Сущность процесса травления заключается в различной растворимости в *травителях* отдельных химически неоднородных структурных составляющих сплава по причине разности их электродных потенциалов. Например зерна феррита в углеродистой конструкционной стали практически не подвержены воздействию *травителя*, а вот зерна перлита на оборот весьма активно начинают растворяться с образованием на поверхности *микрошлифа* ярко выраженного микрорельефа. Образовавшийся микрорельеф приводит к потускнению поверхности *микрошлифа* после травления.

Наносить *травящий состав* на отполированную поверхность *микрошлифа* можно с помощью ватной палочки, растирая *травитель* по всей поверхности.

Время травления зависит от концентрации реактива, природы металлического материала и, как правило, устанавливается экспериментально до появления признаков протравки: изменение отражательной способности и цвета поверхности *шлифа*.

После травления *шлифа* его поверхность необходимо обработать медицинским (техническим) спиртом для нейтрализации *травящего состава*.

Просушивают поверхность *шлифа* промоканием его поверхности мягкой фильтровальной бумагой или бумажной салфеткой.

Далее *микрошлиф* помещается на предметный столик металлографического микроскопа [7,8] и изучается его структура.

Оптические микроскопы, которыми пользуются при металлографическом анализе, работают в отраженном свете (рис. IV.6).



Рис. IV. 6. Внешний вид металлографического микроскопа

Как следует из законов оптики, в оптическом микроскопе можно различить объекты размером не менее $0,3 \text{ мкм}$. Эта величина определяется длиной волны видимого света, а также входящим углом объектива и показателем преломления среды между шлифом и объективом. Обычно такой средой является воздух с показателем преломления $n = 1$. Если между шлифом и объективом поместить среду с большим показателем преломления, например кедровое масло ($n = 1,51$), то разрешающая способность увеличится в 1,5 раза, что позволит различать объекты величиной $0,2 \text{ мкм}$. Практически в металлографических оптических микроскопах используют увеличения от 100 до 1000 раз. Металлографический микроскоп рассматривает металл в отражённом свете (главное отличие от биологического микроскопа, где предмет рассматривается в проходящем свете).

Задачи исследования:

- оценка формы и размеров кристаллических зерен металлов и сплавов;
- определение формы и размеров неметаллических включений – сульфидов, оксидов и др.;

- определение микропороков – микротрещин, раковин, пор и др.;
- анализ изменения микроструктуры сплавов после термической, химико-термической обработки и обработки металлов давлением;
- определение химического состава некоторых структурных составляющих по их характерной форме и окраске после применения избирательных травителей.

Общие сведения о металлографических микроскопах [9]

При нормальном зрении невооруженный глаз человека четко различает объекты, находящие от него на расстоянии не более 250 мм. Это расстояние принято называть расстоянием «наилучшего видения». На этом расстоянии глаз может видеть отдельно расположенные точки, расстояние между которыми не превышает 0,2 мм. Для того чтобы увеличить рассматриваемый объект, нужно увеличить угол зрения.

С целью увеличения изображения объекта применяют оптические приборы, такие как лупы и микроскопы. Действие таких оптических приборов при исследовании мелких объектов, вооружающих человеческий глаз, сводится к увеличению угла зрения. Оптические приборы во столько раз увеличивают изображение объекта, во сколько раз угол зрения, создаваемый им при увеличении объекта, больше угла зрения, под которым невооруженный глаз человека видит данный объект на расстоянии приблизительно равное 250 мм.

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать при увеличении непрозрачные тела в отраженном свете. В этом заключается основное отличие металлографического микроскопа от биологического, в котором рассматриваются прозрачные тела в проходящем свете.

В конструкции современного металлографического микроскопов имеются следующие основные узлы:

- собственно микроскоп, т.е. система объектива и окуляра с приспособлением для установки объекта и для фокусировки;

- осветительная часть микроскопа, включающая источник света, коллекторные и вспомогательные линзы, светофильтры и диафрагмы осветителя;
- фотокамера с оптической системой;
- штатив или оптическая скамья с приспособлениями, обеспечивающими строго определенное взаимное расположение всех элементов оптики микроскопа.

Оптико-геометрическая схема микроскопа приведена на *рисунке IV.7*.

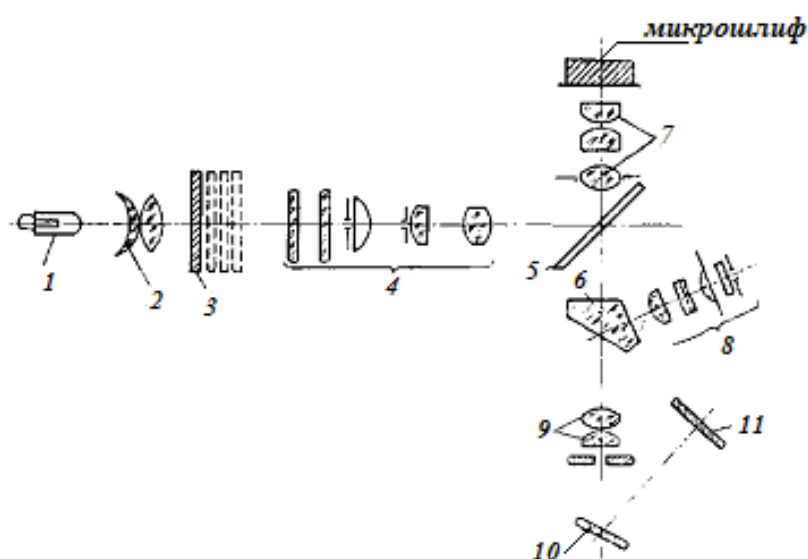


Рис. IV.7. Оптико-геометрическая схема микроскопа:

1 – источник света; 2 – коллектор; 3 – матовое стекло; 4 – конденсор; 5 – светоделитель; 6 – крышеобразная поворотная призма; 7 – объектив микроскопа; 8 – окуляр; 9 – проекционная линза с диафрагмой; 10 – поворотное зеркало; 11 – фотографический экран.

Необходимо понимать, что в микроскопе механическая часть также важна, как и оптическая. Механическая конструкция должна обеспечивать жесткость и точность установки отдельных узлов микроскопа, возможность смены и регулировки элементов схемы.

Увеличение объекта в микроскопе происходит в две стадии: первое увеличение дает объектив, второе – окуляр. Объектив и окуляр представляют собой сложные оптические системы и состоят из нескольких линз.

Общее увеличение микроскопа M равно:

$$M = M_{об} \times M_{ок}, \quad (IV.1)$$

где $M_{об}$ – увеличение объектива, $M_{ок}$ – увеличение окуляра.

Увеличение объектива $M_{об}$ определяется по формуле

$$M_{об} = \Delta / f_{об}, \quad (IV.2)$$

где $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива, Δ – расстояние между задней фокальной плоскостью объектива и передней фокальной плоскостью окуляра – оптическая длина тубуса микроскопа.

Увеличение окуляра определяется по формуле

$$M_{ок} = D / f_{ок}, \quad (IV.3)$$

где D – расстояние наилучшего видения 250 мм; $f_{ок}$ – фокусное расстояние окуляра.

Максимальное полезное увеличение микроскопа, т. е. увеличение с которым выявляются детали рассматриваемого предмета, определяется по формуле

$$M = d_l / d, \quad (IV.4)$$

где d_l – максимальная разрешающая способность человеческого глаза, равная 0,3 мм, d – максимальная разрешающая способность оптической системы.

Максимальная разрешающая способность оптической системы определяется из условий дифракции согласно уравнению

$$d = \lambda / (2n \sin \alpha/2), \quad (IV.5)$$

где λ – длина волны света (для белого света 600 нм); n – коэффициент преломления; $\alpha/2$ – половина угла раскрытия входящего светового пучка.

Аберрации оптической системы

Аберрациями оптической системы называются ее недостатки, приводящие к искажению изображения. Различают сферическую и хроматическую аберрации.

Сферическая аберрация приводит к тому, что рассматриваемая точка изображается не резко, а расплывчато. Это происходит из-за того, что угол преломления лучей, попадающих на край линзы, больше, чем лучей, проходящих ближе к центру линзы. При этом лучи, прошедшие через линзу,

пересекаются не в одной точке, а образуют в плоскости круг небольшого диаметра.

Уменьшение *сферической aberrации* достигается изменением геометрии поверхности линзы при ее изготовлении, или срезая крайние лучи.

Хроматическая aberrация приводит к несовпадению изображений, созданных лучами разной длины волны (различного цвета). Данный дефект возникает в результате дисперсии (разложения) света при прохождении через линзу. При *хроматической aberrации* изображение, создаваемое красными лучами, не совпадает с изображениями, создаваемыми зелеными и синими лучами. В результате этого дефекта контуры изображения не имеют четкой границы; вокруг изображения имеется нерезкая кайма.

Для уменьшения *хроматической aberrации* в объектив устанавливают коррекционные линзы.

Объективы

Объектив является сложной оптической системой линз, собранных в металлическую трубчатую оправку. Объективы, как правило, характеризуются *фокусным расстоянием* и *числовой апертурой*. В зависимости от числовой апертуры объективы делятся на три группы:

- объективы *малых апертур* $A \leq 0,2$;
- объективы *средних апертур* $A \leq 0,65$;
- объективы *больших апертур* $A > 0,65$.

В зависимости от среды между фронтальной линзой и поверхностью объекта объективы больших увеличений бывают сухие и иммерсионные. Так как сильные объективы имеют очень малое рабочее расстояние (расстояние между шлифом и фронтальной линзой до $0,1\text{ мм}$), чтобы не повредить фронтальную линзу, фокусировку ведут очень осторожно. Для предотвращения повреждений такие объективы изготавливают в специальной пружинной оправке.

По степени исправления *хроматических aberrаций* объективы делятся на :

- *ахроматические*;
- *полуахроматические*;
- *флюоритовые*;
- *апохроматические*.

В *ахроматах* aberrация исправлена для двух длин волн, их применяют для малых и средних увеличений. В *апохроматах* aberrация исправлена для трех длин волн, поэтому в них выше степень коррекции. *Апохроматы* применяют для больших увеличений.

Аберрации в *полуахроматических* и *флюоритовых* объективах меньше, чем в *ахроматических*.

Однако изображения, получаемые этими объективами, резкие только в центре, по краям же размытые. С целью получения плоского поля применяют *планахроматические* и *планоахроматические* объективы, устраняющие *хроматические aberrации*.

Окуляры увеличивают изображение, получаемое на *объективе*.

Они характеризуются собственным увеличением, а также качеством коррекции изображения.

Собственное увеличение *окуляров*, используемых при визуальной работе, обычно выгравировано на их оправе. Металлографические микроскопы снабжаются окулярами с увеличением от 3 до 20.

По роду и степени коррекции различают:

- *простые, или окуляры Гюйгенса*;
- *компенсационные окуляры*;
- *выравниватели (гомалы)*.

Многообразие типов окуляров обусловлено задачами коррекции изображения в связи с выбором типа объектива и методами микроскопического исследования (визуальная работа или микрофотографирование).

Окуляр Гюйгенса имеет наиболее простую конструкцию. Передняя линза (глазная) дает увеличение изображения, образованного в плоскости диафрагмы окуляра объективом и задней линзой окуляра (полевой). Полевая линза в некоторой степени выправляет кривизну поля изображения.

Наиболее применяемые стандартные *увеличения окуляров Гюйгенса* – 4; 7; 10; 15.

Для визуальной работы *окуляры Гюйгенса* целесообразно использовать с *объективами-ахроматами*. В микрофотографической работе при малых увеличениях для получения хороших результатов рекомендуют использование темно-зеленого светофильтра.

Компенсационные окуляры специально рассчитывают для применения с *объективами-апохроматами*. *Компенсационные окуляры* малого и среднего увеличений (3; 5; 7; 10) по своей конструкции подобны окулярам Гюйгенса, но в отличие от них одна из линз двойная для исправления. Так как *объективы-апохроматы* дают изображение значительно лучшего качества, чем *ахроматы*, то также применяют *окуляры с большим увеличением (15;20)*.

При использовании *компенсационных окуляров* поле зрения еще более искривлено, чем у *объективов-ахроматов* в комбинации с *окулярами Гюйгенса*, что ограничивает их использование при микрофотографировании.

Системы типа *гомал* имеют отрицательное фокусное расстояние (от -20 до -70) и, следовательно, не могут быть использованы как *лупа* или как *окуляр* для визуальной работы. Их ограниченно используют для микрофотографирования.

Гомалы в соединении с *объективами-апохроматами* дают плоское изображение довольно высокого качества. Они могут также применяться с *объективами-ахроматами* при средних и больших увеличениях.

Светофильтры используются с целью изменения контрастности изображения, повышения качества изображения, защиты от теплового излучения и уменьшения освещенности.

Количество или интенсивность света, а так же его основные качественные характеристики – спектральная и поляризационная, поддаются регулированию и контролю в *оптическом микроскопе* с помощью *светофильтров* и *полярофильтров*.

Применяются две группы *светофильтров*:

- *нейтральные светофильтры* - не изменяют качественные характеристики света, но снижают его интенсивность (прозрачные нейтральные светофильтры) или меняют распределение интенсивности по направлению (рассеивающие пластинки);
- *цветные светофильтры* - обладают свойством избирательного или селективного поглощения света определенных дин волн (цветов).

Особо следует отметить следующие группы *цветных светофильтров*:

- *монокроматические* светофильтры, поглощающие все лучи за исключением узкой полосы спектра;
- *компенсационные* светофильтры, поглощающие излучение коротковолновой части спектра (синие, фиолетовые, ультрафиолетовые лучи);
- *тепловые* фильтры, пропускающие лучи широкой части спектра за исключением длинноволновых инфракрасных или тепловых лучей.

Человеческий глаз обладает разной чувствительностью к разным цветам спектра. Необходимо отметить, что наибольшая чувствительность проявляется в отношении желто-зеленого цвета. *Желто-зеленые светофильтры* не только уменьшают *хроматическую абберацию*, они также *повышают разрешающую способность* объектива, выделяя лучи с меньшей длиной волны, что позволяет более четко наблюдать особенности микроструктуры.

Методы выявления микроструктуры

Изучение строение металлов и сплавов осуществляется на металлографических микроскопах сначала в полированном состоянии, затем

после выявления микроструктуры границ между фазами с помощью электрополирования и травления.

Большинство способов выявления микроструктуры сводится к выявлению, получению рельефа на поверхности зерен и окрашиванию структурных составляющих.

Основные методы выявления микроструктуры:

- *химическое травление;*
- *электрохимическое травление;*
- *тепловое травление;*
- *травление в солях при повышенных температурах.*

При *химическом травлении* поверхность микрошлифа подвергается реактивов при заданной температуре. При этом выявление микроструктуры выполняют разными способами: погружением образца в травитель, смачиваем поверхности микрошлифа травителем и втиранием травителя в поверхность шлифа.

При составлении реактивов в качестве растворителей могут применять водопроводную или дистиллированную воду, различные спирты (этиловый, метиловый, бутиловый и т.п.). Все применяемые для составления реактивов вещества должны иметь высокую степень чистоты, от этого зависит качество микрошлифа. В приложении 1 приведены составы некоторых реактивов.

Под действием химических реагентов в чистых металлах и однофазных сплавах прежде всего выявляются границы зерен. Для выявления линий сдвига, двойников и т.п. необходимо более длительное и интенсивное травление. Растворение происходит и по поверхности зерен, но его скорость значительно ниже, чем на границах. После травления из-за потери отраженного света в углублениях между зернами границы зерен видны тонкими темными линиями.

При *электрохимическом травлении* приготовленный микрошлиф в качестве анода помещают в специальный раствор (электролит), катодом

является металлическая пластина. При этом происходит растворение определенных фаз сплава и выявление его микроструктуры. Особенно эффективен такой способ травления при выявлении структуры чистых металлов и твердых растворов. Однако приходится корректировать режим обработки для разных металлических материалов.

Электрохимическое травление обычно применяют для сплавов, из которых трудно приготовить микрошлифы, и если сплав сильно окисляется при химическом травлении или очень трудно поддается травлению.

При *тепловом травлении* на поверхности металла в следствие нагрева и в результате взаимодействия с кислородом воздуха образуется окисная пленка. В первую очередь окисление происходит по границам зерен и различных фаз. При окислении поверхность *микрошлифа* сначала становится матовой, а потом приобретает различную окраску, которая зависит от химсостава сплава или фазы, температуры и продолжительности нагрева. Чем больше различаются фазы по способности к окислению, тем точнее будет результат.

Выявление структуры *травлением в солях* при повышенных температурах проводится тогда, когда другими методами она выявляется недостаточно хорошо или вообще не выявляется. Данный метод применяется для сплавов на основе хрома, вольфрама, никеля, ниобия и других металлов. Хорошо отполированный и обезжиренный микрошлиф погружают в расплавленную соль ($NaCl$, $NaNO_3$, KNO_3 , KOH , K_2O) на определенное время при температурах $300-860^{\circ}C$. В зависимости от химсостава стали и используемой соли на поверхности микрошлифа окисные пленки разной окраски (разного состава).

Выявление неметаллических включений

Неметаллические включения – макро и микрочастицы в металлах и сплавах, образующиеся в результате различных физико-химических процессов, которые происходят при выплавке металла и его кристаллизации.

Различают природные и посторонние неметаллические включения. Природные включения в основном образуются в результате химических реакций, проходящих при производстве металла. К этим включениям относятся, например, сульфиды и нитриды.

Посторонние включения (частицы кварца и огнеупоров, включения шлака и др.) попадают в металл в процессе производства, внесение этих включений носит обычно механический характер.

В сталях могут быть неметаллические включения различного состава и строения. В основном это окислы простые и сложные, сульфиды, силикаты, фосфиды, нитриды и другие соединения.

В процессе *раскисления* стали образуются соединения кислорода и кремния, которые, как правило, переходят в шлак, и лишь незначительная их часть остается в стали в виде простых и сложных оксидных и силикатных включений (FeO , $FeO \cdot Cr_2O_3$, SiO_2 , $Al_2O_3 \cdot SiO_2$, и др.).

При охлаждении расплавленной стали растворенная в ней сера выделяется в виде сульфидных включений: сульфиды железа (FeS) и марганца (MnS), окисульфидные включения железа и марганца, сульфиды титана, молибдена и других элементов.

Фосфиды в стали обычно не встречаются, но в низкоуглеродистых сталях с повышенным содержанием фосфора имеются кислородные включения фосфора ($FeO-P_2O_5$) и фосфид железа (Fe_2P).

Нитриды и карбонитриды можно обнаружить в сталях, содержащих сильные нитридообразующие элементы (Ti , Zr , Nb , V), т.е. элементы, которые с азотом образуют стойкие нитриды.

Из посторонних включений в сталях встречаются частицы кварца, стекла различного состава, включения огнеупоров и шлака.

В *чугунах* присутствуют те же основные виды включений. Некоторое различие в их характере обусловлена более высоким содержанием углерода. Значительно чаще, чем в стали, в чугунах в составе эвтектики встречаются фосфидные включения.

В *цветных металлах и сплавах* чаще всего наблюдаются кислородные, сульфидные и фосфидные включения.

В большинстве случаев неметаллические включения оказывают вредное влияние на свойства металла: уменьшают прочность и пластичность, понижают сопротивление коррозии, ухудшают технологические свойства.

Неметаллические включения определяют по физическим, химическим, геометрическим и механическим признакам. К таким признакам относятся: размер и форма, изменение формы при пластической деформации, цвет, способность к отражению света, отношение к различным химическим реактивам.

Неметаллические включения могут иметь различные размеры, зависящие от условий выплавки и охлаждения. Природные включения обычно имеют размеры в пределах $2 \div 150$ мкм. Для окиси алюминия характерны размеры от 2 до 7 мкм, сульфидов марганца и железа – от 2 до 8 мкм, силикатных включений – до 150 мкм. Размер силикатных частиц зависит от скорости затвердевания жидкого металла: чем меньше скорость охлаждения, тем крупнее частицы. Наиболее крупными являются посторонние включения. Частицы неметаллических включений могут иметь самую разнообразную форму. Включения закиси железа и силикатные стекла имеют округлую форму, нитриды титана и циркония – правильную кристаллическую формы. Могут наблюдаться включения в виде дендритов (сульфид марганца). Кроме этого *неметаллические включения* могут располагаться в виде сплошной или прерывистой пленки по границам зерен: сульфиды железа (FeS), никеля (Ni_3S_2), закись меди (Cu_2O).

В процессе пластической деформации *неметаллические включения* могут изменять свою форму. Пластичные включения деформируются вместе с металлом, вытягиваясь в нити, в строчки (закись железа, сульфидные включения железа и марганца, окисульфидные включения, ряд силикатов). Если включения недостаточно пластичны, то при деформации они разламываются и принимают прерывистые очертания (силикатные

включения с повышенным содержанием кремнезема). Однако ряд твердых включений сохраняет при деформации свою первоначальную форму (нитриды титана и ниобия, карбонитриды титана).

Хрупкие частицы при деформации разламываются и имеют вид цепочек (частицы посторонних включений огнеупоров). Так как отражательная способность большинства *неметаллических включений* значительно ниже, чем металла, то под микроскопом они выглядят значительно темнее. Сульфиды и окислы обладают лучшей отражательной способностью, чем силикатные включения, поэтому под микроскопом выглядят более светлыми.

Для изучения *неметаллических включений*, чтобы избежать выкрашивания твердых и хрупких включений, шлифы изготавливают особенно осторожно.

При изучении *неметаллических включений* определяют их природу, количественное содержание и устанавливают закономерности в их распределении. В сталях металлографические методы определения неметаллических включений регламентированы в соответствии с ГОСТ 1778-70 [10].

Количественная металлография

Все существующие стандартные методы количественного металлографического анализа основаны на исследовании структуры выявленной в сечении микрошлифа (ГОСТ 5639-82).

Величина зерна в плоскости металлографического шлифа определяется методами:

- визуального сравнения видимых под микроскопом зерен с эталонами шкал с определением номера зерна;
- подсчета количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерна;

- подсчета пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра в случае равноосных зерен, количества зерен в 1 мм^3 в случае неравноосных зерен;
- измерения длин хорд под микроскопом или с использованием микрофотографий с определением относительной доли зерен определенного размера;
- ультразвуковым.

Величину зерна методом сравнением с эталонными шкалами определяют при увеличении $100\times$. После просмотра всей площади шлифа выбирают несколько типичных мест и сравнивают с эталонами, приведенными в шкалах приложения (ГОСТ 5639-82) [11]. Сравнение можно проводить, наблюдая изображение в окуляре микроскопа или фотоснимке. Шкалы 1 - 3 представлены десятью эталонами в виде схематизированной сетки, ограничивающей размеры зерен. Эталоны приведены в виде круга диаметром $79,8 \text{ мм}$, что соответствует площади на шлифе $0,5 \text{ мм}^2$.

Средние численные значения площади зерна, числа зерен в 1 мм^3 , диаметра и условного диаметра, а также числа зерен на площади в 1 мм^2 , соответствующие эталонам специальной шкалы.

Метод подсчета зерен заключается в определении количества зерен на единице поверхности шлифа (1 мм^2) и расчете средней площади зерна и среднего диаметра зерен. Подсчет зерен можно проводить на микрофотографиях, в которых поле зрения ограничивают одной из плоских фигур: окружностью диаметром $79,8 \text{ мм}$ или квадратом со стороной $70,7 \text{ мм}$, или прямоугольником с размерами сторон 65×77 , 60×83 , 55×91 или $50 \times 100 \text{ мм}$, что соответствует $0,5 \text{ мм}^2$ поверхности шлифа при увеличении $100\times$.

Подсчитывают число зерен, попавших внутрь выбранной фигуры, и число зерен, пересеченных ее границами. Примеры подсчета количества зерен на единицу поверхности шлифа и расчета средней площади и среднего диаметра зерна приведены в ГОСТ 5639-82 [11].

IV.1.2. Микроструктуры сталей при различных термических обработках

Суть любого вида термической обработки заключается в нагреве сплава при определенных температурах и его охлаждении с разными скоростями.

С целью уменьшения внутренних напряжений, устранения химической и структурной неоднородности, получения мелкозернистой структуры, понижения твердости для облегчения механической обработки проводят отжиг или нормализацию.

На производстве используются два принципиально вида отжига – *отжиг I рода* и *отжиг II рода*.

Особенностью всех разновидностей *отжига I рода* является то, что они протекают независимо от того, идут ли при этом фазовые превращения или нет.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) проводится для устранения химической неоднородности – дендритной и внутрикристаллитной ликвации, которая свойственна слиткам и отливкам из легированных сталей.

Вследствии высокой температуры нагрева ($1050-1250^{\circ}\text{C}$) и длительной выдержки ($10\div 20$ ч) образуется крупнозернистая структура, что устраняется при обработке давлением или последующей термической обработкой.

Рекристаллизационный (низкий) отжиг для устранения влияния наклепа и снятия внутренних напряжений в стали после холодной обработки металла давлением или как промежуточный отжиг для повышения пластичности и предупреждения появления трещин в стали при холодной обработке давлением.

При *рекристаллизационном отжиге* холоднодеформируемые стали греют выше температуры начала рекристаллизации на $50\div 100^{\circ}\text{C}$ ниже линии *SK* (рис. II.18), выдерживают при этой температуре, затем охлаждают на воздухе. В результате данного отжига образуется однородная мелкозернистая структура с небольшой твердостью и значительной вязкостью.

Отжиг для снятия внутренних напряжений проводят с целью уменьшения остаточных напряжений, возникающих в металле в процессе производства. На практике отжиг стальных деталей производят в интервале температур $160-700^{\circ}\text{C}$ с последующим медленным охлаждением. В результате этого происходит полное или частичное снятие внутренних напряжений.

Отжиг II рода основан на фазовом превращении.

Полный отжиг основан на фазовой перекристаллизации и измельчении зерна. Нагрев стали ведут на $30-50^{\circ}\text{C}$ выше линии A_{C1} (рис. II.21), выдерживают при этой температуре, затем медленно охлаждают (вместе с печью).

В результате полного отжига образуется мелкое зерно. Данным видом *отжига* можно устранить два порока структуры *доэвтектоидной стали* – *видманинитеттовую* структуру и *строчечность*.

Неполный отжиг основан на частичной фазовой перекристаллизации и измельчении зерна. Нагрев стали ведут на $30-50^{\circ}\text{C}$ выше линии A_{C1} (рис. II.21), выдерживают при этой температуре, затем медленно охлаждают.

При нагреве некоторые структурные составляющие (в *доэвтектоидных сталях* – *феррит*, в *заэвтектоидных сталях* – *цементит*) не переходят в твердый раствор, поэтому сохраняются в структуре после *отжига*. Такой вид *отжига* является альтернативой *полному отжигу*, что позволяет сэкономить время и уменьшить себестоимость обработки.

Для *доэвтектоидных сталей* *неполный отжиг* применяют с целью снятия внутренних напряжений и создания мелкозернистой структуры.

Неполный отжиг широко применяется для *заэвтектоидных углеродистых и легированных сталей*. Нагрев *заэвтектоидных сталей* осуществляют на $10-30^{\circ}\text{C}$ выше линии A_{C1} (рис. II.21) с длительной выдержкой ($5\div 6$ ч), последующее охлаждение приведет к получению зернистой (сфероидальной) формы перлита вместо обычной пластинчатой,

что позволит улучшить обрабатываемость резанием. Такой вид отжига называется *сфероидизирующим*.

Изотермический отжиг применяют для улучшения обрабатываемости легированных сталей. Нагрев таких сталей производят выше линии A_{C1} (рис. II.21), как и при полном отжиге, затем сравнительно быстро охлаждают до температуры ниже линии A_{C1} ($660\div 680^\circ\text{C}$) и изотермически выдерживают при этой температуре до полного распада аустенита, после чего охлаждают на воздухе. Так как распад аустенита происходит не при охлаждении, а при постоянной температуре, получается более однородная структура.

После *изотермического отжига* стали приобретают такие же свойства, как и после *полного отжига*. При этом происходит полное устранение внутренних напряжений и значительное сокращение *времени отжига*.

Нормализационный отжиг (нормализация) по режиму является промежуточной операцией между отжигом и закалкой.

При нормализации сталь нагревают на $30\div 50^\circ\text{C}$ выше линий SK (рис. II.18), выдерживают и охлаждают на воздухе. Ускоренное в сравнении с обычным отжигом охлаждение приводит к большему переохлаждению аустенита. Поэтому при нормализации получается более тонкое строение *эвтектоидной смеси* и более мелкое зерно.

Нормализацией можно решать разнообразные задачи: получение однородной мелкозернистой структуры, частичное снятие напряжений, улучшения обрабатываемости, устранение цементитной сетки (для *завтектоидных сталей*).

Изменение свойств стали при закалке является результатом образования неравновесных структур. Быстрое охлаждение стали при закалке предотвращает превращение из аустенита в перлит.

В зависимости от температуры нагрева различают *полную* и *неполную закалку*.

При *полной закалке доэвтектоидную* углеродистую сталь нагревают на $30\div 50^\circ\text{C}$ выше линии A_{C1} (рис. II.21) для получения аустенитной структуры. В

результате закалки образуется многократно пересыщенный раствор углерода в α -железе с тетрагональной кристаллической решеткой или мартенсит (рис. IV. 8). Характерный признак мартенситной структуры – ориентированная игольчатая структура, имеющая высокую твердость ($600 \div 700 \text{ HB}$). В результате *полной закалки доэвтектоидной стали* в структуре наряду с мартенситом присутствует некоторое количество остаточного аустенита.

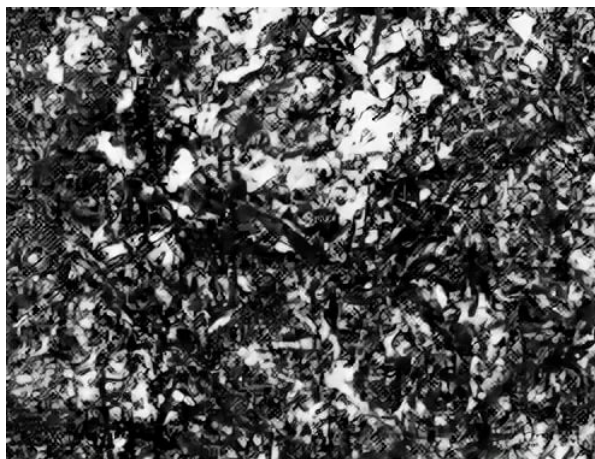


Рис. IV. 8. Мелкоигольчатый мартенсит, $\times 500$

При *неполной закалке доэвтектоидную углеродистую сталь* нагревают на $30 \div 50^\circ\text{C}$ выше линии A_{C1} (рис. II.21). При этом образуется двухфазная структура: аустенит и феррит. При последующем быстром охлаждении аустенит превращается в мартенсит, а феррит остается без изменений. При рассмотрении структуры на металлографическом микроскопе кроме мелкоигольчатого мартенсита видны светлые зерна феррита. Вследствие наличия ферритной составляющей сталь с такой структурой неоднородна и недостаточно твердая, поэтому *такой вид закалки для доэвтектоидных сталей не применяется*.

При *неполной закалке заэвтектоидные стали*, также как и *эвтектоидную сталь*, нагревают на $30 \div 50^\circ\text{C}$ выше линии A_{C1} (рис. II.21) для получения двухфазной структуры с целью сохранения цементитной составляющей. После закалки эти стали приобретают структуру мартенсита и цементита. Округлые включения цементита увеличивают твердость и износостойкость стали. Так как нагрев производится ниже линии A_{C1} , это

ведет к уменьшению роста зерна и некоторому снижению внутренних напряжений.

Повышение температуры закалки выше линии A_{C1} приводит к снижению твердости из-за растворения избыточного цементита и увеличению остаточного аустенита в мартенситной структуре таких сталей. Количество остаточного аустенита повышается с увеличением содержания углерода. Кроме того в результате закалки с такой температуры образуются крупные иглы мартенсита, что также ведет к снижению механических свойств.

Таким образом, для *доэвтектоидных сталей* рационально применять *полную закалку*, для *заэвтектоидных сталей* – *неполную закалку*.

Закаленная сталь всегда находится в структурно напряженном состоянии. С целью уменьшения остаточных напряжений проводится *отпуск*. Чем выше температура *отпуска* и чем больше его продолжительность, тем в большей степени снимаются внутренние напряжения.

При *отпуске* уменьшаются или полностью снимаются внутренние напряжения как структурного, так и термического происхождения.

Максимальное снятие напряжений достигается при температуре отпуска $500\div 600^{\circ}\text{C}$ и выдержке в течение $1\div 2$ часов. Для предотвращения возникновения дополнительных напряжений после отпуска при $500\div 600^{\circ}\text{C}$ большинство углеродистых сталей следует охлаждать на воздухе.

Основное влияние на свойства стали оказывает *температура отпуска*. В зависимости от температуры нагрева закаленной стали различают *низкий*, *средний* и *высокий отпуск*.

Низкий отпуск проводят при температуре $150\text{-}250^{\circ}\text{C}$ с целью снижения внутренних напряжений и некоторого уменьшения хрупкости мартенсита. При этом *мартенсит закалки* переходит в *мартенсит отпуска* (рис. IV.9); сталь сохраняет твердость ($58\div 63\text{ HRC}$), и, следовательно, высокую износостойкость.

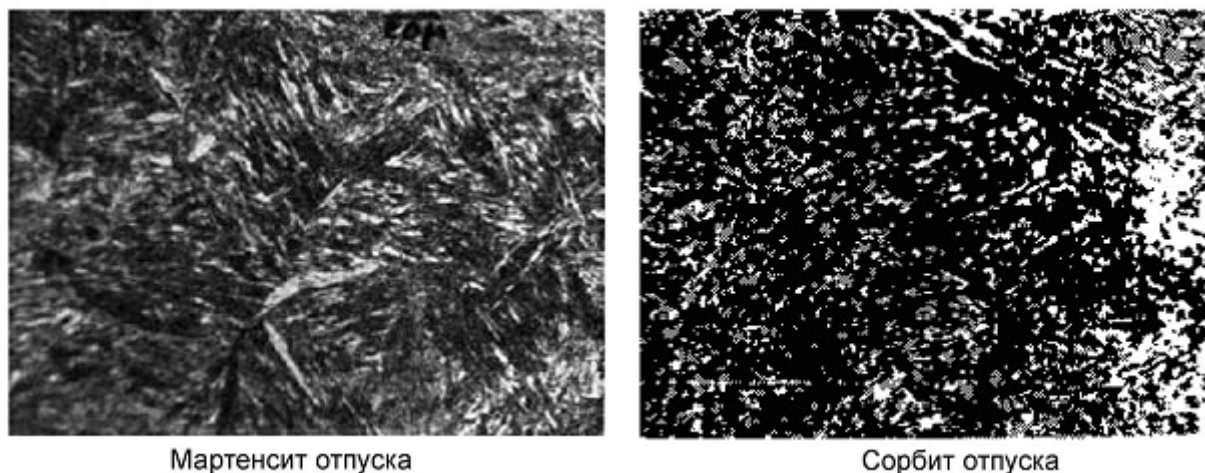


Рис. IV. 9. Мартенсит отпуска. Сорбит отпуска

Низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент из углеродистой и низколегированной стали, а также детали, которые должны иметь высокую твердость и износостойкость.

Средний отпуск проводят при $350\div 500^{\circ}\text{C}$ с целью обеспечения высокого предела упругости, выносливости и релаксационной стойкости, главным образом для рессор и пружин. Структура стали после такого отпуска – троостит отпуска и троосто-мартенсит, твердость стали $40\div 50\text{ HRC}$.

Охлаждение после отпуска при $400\div 450^{\circ}\text{C}$ рекомендуют проводить в воде, для создания на поверхности сжимающих остаточных напряжений, чтобы увеличить предел выносливости пружин.

Высокий отпуск проводят при $550\div 680^{\circ}\text{C}$ с целью обеспечения наилучшего соотношения прочности и вязкости стали. Структура стали после *высокого отпуска* – *сорбит отпуска* (рис. IV. 9).

Высокий отпуск применяют для деталей, которые подвергаются воздействию высоких напряжений и ударным нагрузкам.

Термическая обработка, состоящая из *закалки с высоким отпуском*, называется *улучшением*. Улучшению подвергают среднеуглеродистые ($0,3\div 0,4\text{ \% C}$) стали. По сравнению с отжигом и нормализацией закалка с высоким отпуском повышает предел прочности, предел текучести, относительное сужение и особенно ударную вязкость.

IV.1.3. Микроструктуры чугунов

Чугуны являются железоуглеродистыми сплавами, содержащими более 2,14 % углерода. Присутствие эвтектики в структуре чугунов обуславливает высокие литейные свойства. Их используют для изготовления отливок сложной формы при отсутствии жестких требований по массе и габаритам детали.

В зависимости от формы, в которой присутствует углерод, различают белые, серые, ковкие, высокопрочные чугуны и чугуны с вермикулярным графитом [12].

В белых чугунах весь углерод находится в связанном виде в виде цементита. Название «белый» получил из-за матово-белого цвета излома. При кристаллизации белых чугунов образуется эвтектическая смесь аустенита и цементита – ледобурит, который образуется при температуре 1147 °С. При 727 °С происходит превращение аустенита в перлит, поэтому ниже 727 °С ледобурит представляет собой эвтектическую смесь перлита и цементита. При нормальной температуре фазовый состав белого чугуна – феррит и цементит.

По содержанию углерода согласно диаграммы $Fe-Fe_3C$ различают доэвтектические, эвтектические и заэвтектические белые чугуны.

Доэвтектические белые чугуны содержат 2,14÷4,3 % углерода, они имеют структуру, состоящую из перлита, вторичного цементита и ледобурита (рис. IV. 10).

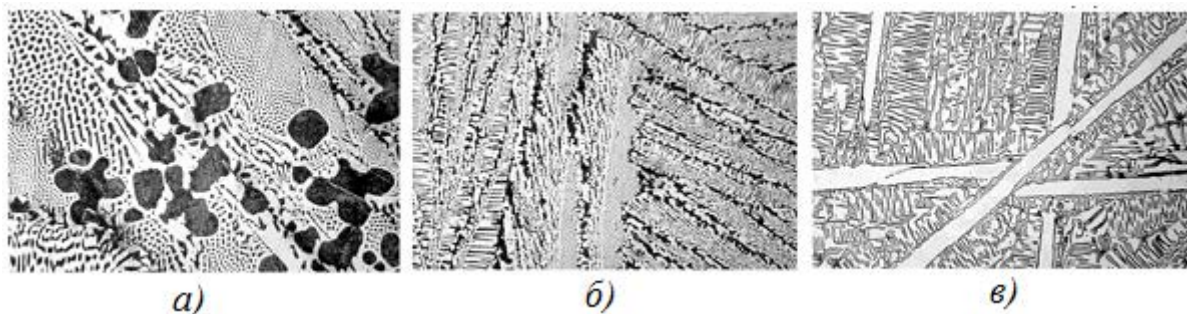


Рис. IV. 10. Микроструктура белых чугунов

а – доэвтектический; б – эвтектический; в – заэвтектический

Количество ледебурита в доэвтектическом белом чугуна увеличивается с повышением содержания углерода. Эвтектический белый чугун содержит 4,3% углерода и состоит только из ледебурита. В микроструктуре заэвтектических белых чугунов (больше 4,3% углерода) кроме ледебурита видны крупные пластины первичного цементита, количество которого увеличивается с повышением содержания углерода. Белые чугуны отличаются высокой твердостью и хрупкостью, низкой прочностью и трудоемкостью механической обработки. Из них изготавливают тормозные колодки, прокатные валки и другие детали, работающие в условиях износа.

В промышленности широкое применение получили серые (рис. IV. 11), ковкие (рис. IV. 12) и высокопрочные чугуны (рис. IV. 13), в которых большая часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде графита.

Серыми называются чугуны с пластинчатым графитом. Такое название они получили по виду излома, который имеет темносерый цвет. Микроструктура серого чугуна, легированного алюминием, приведена на рис. IV.11.

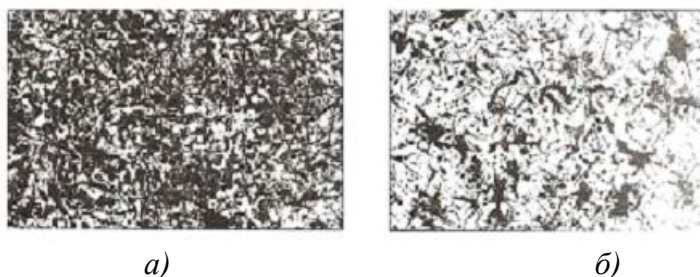


Рис. IV. 11. Микроструктура: серый чугун
а) – феррит (10%), перлит (90%); б) феррит (95%), перлит (5%)

Механические свойства серого чугуна, в пределах относительного процентного содержания феррита и перлита, приведены в таблице IV.1.

Таблица IV.1

Тип чугуна	$\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ²	$\sigma_{\text{с}}$, кгс/мм ²	Стрела прогиба, мм	НВ	KCU, ???/см²
Обычный	16,0	38,0	3,0	163	0,12
Легированный алюминием	33,1	52,5	3,4	255	0,24

Микроструктура таких *чугунов* состоит из металлической основы и графитовых включений. Чем меньше в металлической основе феррита, тем выше прочность *чугунов*. Хрупкие включения графита нарушают сплошность металлической основы, их можно расценивать, как пустоты и трещины. Включения графита играют роль концентратора внутренних напряжений, следовательно работа удара близка к нулю.

Серые чугуны получают при медленном охлаждении и повышенном содержании кремния. Прочность таких чугунов на растяжение находится в пределах $100\div 350$ МПа. Чем больший объем занимают включения графита, тем ниже механические свойства. Свойства этих чугунов будут зависеть не только от количества графитовых включений, но и от их формы и расположения.

Чем выше содержание углерода, тем больше графитовых включений и тем ниже механические свойства. Вследствие этого максимальное количество углерода ограничивается пределами *доэвтектической* концентрации.

Серый перлитный чугун образуется, когда графитизации подвергается весь цементит, входящий в состав ледебурита, и вторичный цементит. Структура такого чугуна после окончательных превращений – перлит с пластинчатым графитом.

Серый ферритный чугун получается при полном распаде цементита, входящего в состав ледебурита, перлита и структурно свободного цементита. Структура данного чугуна – феррит и пластинчатый графит.

Серый феррито-перлитный чугун характеризуется меньшей степенью графитизации, в процессе которой происходит распад цементита, входящего в состав ледебурита, вторичного цементита и цементита, входящего в состав перлита, и образуется структурно свободный перлит, освобождающийся из перлита. Структура чугуна – феррит, перлит и пластинчатый графит.

Иногда в структуре *чугунов* наряду с пластинчатым графитом имеется ледебурит. Такой *чугун* серо-белый в изломе называется половинчатым. Структура – перлит, ледебурит и пластинчатый графит.

Пластинки графита уменьшают временное сопротивление на растяжение и значительно снижают пластичность. Наименьшей прочностью обладают ферритный серый чугун. Графит мало влияет на снижение временного сопротивления при сжатии. Именно поэтому чугун рекомендуется использовать для деталей, работающих на сжатие.

Серый чугун имеет высокие литейные свойства, менее хрупок по сравнению с *белым чугуном*, обладает хорошими антифрикционными свойствами и обрабатываемостью резанием.

Ковкие чугуны получают из *белого чугуна* при высоких температурах в процессе специального графитизирующего *отжига* ($900 \div 1000$ °C) отливок – томления (*рис. IV.12*). При этом цементит распадается и образуется графит хлопьевидной формы. Такой графит по сравнению с пластинчатым значительно меньше снижает прочность и пластичность металлической основы, вследствие этого *ковкие чугуны* по сравнению с *серыми* имеют более высокую прочность при растяжении и пластичность ($2 \div 15$ %).

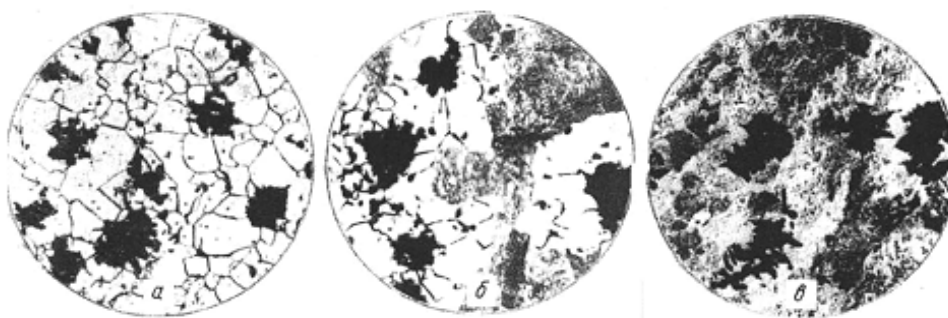


Рис. IV. 12. Микроструктура: ковкие чугуны

В зависимости от степени распада цементита при отжиге *ковкие чугуны* подразделяют на *ферритные* и *перлитные*, а также на *ферритоперлитные*.

Ферритный ковкий чугун имеет структуру, состоящую из феррита и включений хлопьевидного графита, *перлитный ковкий чугун* – из перлита и включений хлопьевидного графита.

Прочность при растяжении *ковкого чугуна* может меняться от 300 до 800 МПа.

Из *ковких чугунов* изготавливают детали высокой прочности, работающие в условиях повышенного износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки [13].

Высокопрочными чугунами называются чугуны с включениями графита шаровидной формы, их получают при модифицировании серых чугунов. Перед разливкой в чугун добавляют небольшое количество магния или церия (в количестве 0,03 – 0,08 % от массы обрабатываемого чугуна). Шаровидный графит менее сильный концентратор напряжений по сравнению с пластинчатым, что меньше ослабляет металлическую основу (рис. IV.12,в) и обеспечивает более высокие механические свойства. Прочность этого чугуна $\sigma_{\text{вр}} = 350 \div 1000 \text{ МПа}$.

Из *высокопрочных чугунов* (рис. IV.13) изготавливают ответственные детали, например, коленчатые валы, прокатные валки, зубчатые колеса и т.п.

Для повышения механических свойств отливки, изготовленные из *высокопрочных чугунов* могут подвергаться термической обработке:

для увеличения прочности проводят закалку и отпуск при 500÷600°C, для повышения пластичности – отжиг, способствующий сфероидизации перлита.

Наряду с шаровидным графитом *высокопрочные чугуны* могут содержать графит вермикулярной формы в виде изогнутых лепестков, размеры которых меньше в сравнении с пластинами графита серых чугунов. Вермикулярный графит формируется под действием комплексного модификатора, который содержит магний и малые добавки *Ce* и *Te*.

По механическим свойствам чугуны с вермикулярным графитом являются переходной формой от пластинчатого к шарообразному графиту. Такой чугун применяют для изготовления деталей, которые подвергаются циклическим нагрузкам и частым теплосменам, например, поршни, гильзы и т.п.

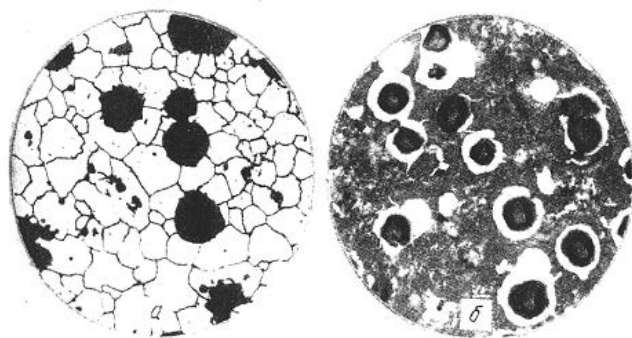


Рис. IV. 13. Микроструктура: высокопрочные чугуны

Наличие графита снижает твердость и улучшает обрабатываемость резанием, делая стружку ломкой. Также графит повышает износостойкость и обеспечивает высокие антифрикционные свойства из-за низкого коэффициента трения вследствие собственного «смазывающего» действия и повышения прочности пленки смазывающего материала.

IV.1.4. Микроструктура алюминия и его сплавов

Алюминий – парамагнитный легкий металл ($2,7 \text{ г/см}^3$) серебристо-белого цвета. Температура плавления 660°C . *Алюминий* кристаллизуется в гранецентрированную кубическую решетку с периодом $a = 0,4041 \text{ нм}$. *Алюминий* обладает хорошими теплопроводностью и электрической проводимостью, высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки Al_2O_3 .

Чем чище *алюминий*, тем выше его коррозионная стойкость. Оксидная пленка защищает алюминий от дальнейшего взаимодействия с окружающей средой даже в условиях чрезвычайно влажного климата и морской воды. Окись алюминия имеет удельный объем, близкий к удельному объему алюминия, поэтому не происходит ее коррозионное растрескивание. Алюминий устойчив в тех средах, которые не разрушают защитную оксидную пленку [14].

При обычных температурах *алюминий* не взаимодействует с водой, парами воды, CO , CO_2 , лишь при достаточно высоких температурах он

реагирует с ними. Скорость коррозии алюминия резко возрастает в присутствии в воде примесей щелочей, солей ртути, меди и т.п.

Технический алюминий специально не легируют. Железо и кремний являются постоянными примесями, которые практически нерастворимы в алюминии. Даже при незначительном содержании железа, образуется эвтектика $Al+Al_3Fe$. При одновременном содержании железа и кремния появляется тройное химическое соединение $Al-Fe-Si$.

Алюминий характеризуется малой плотностью ($2,7\text{г/см}^3$), высокой пластичностью ($\delta \sim 40\%$), низкой прочностью ($\sigma_s=80\text{МПа}$) и твёрдостью ($HB25$). Обладает высокой тепло- и электропроводностью и коррозионной стойкостью. Постоянные примеси алюминия – Fe , Si , Cu , Zn , Ti ухудшают все эти свойства. На рисунке IV. 14 тёмные включения – примеси Al_3Fe .

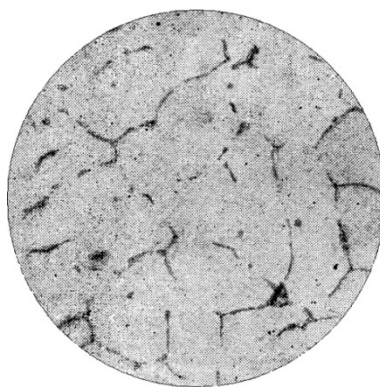


Рис. IV. 14. Микроструктура литого технического алюминия ($200\times$)

Дюралюмины – многокомпонентные сплавы системы $Al-Cu-Mg-Mn$. Упрочняются термической обработкой, которая состоит из закалки и естественного старения. В результате такой обработки они получают прочность до $450...500\text{МПа}$ ($45...50\text{кгс/мм}^2$), а пластичность практически не меняется. Достоинством дюралюминов является высокая удельная прочность, недостатком – низкая коррозионная стойкость.

Светлое поле у дюралюминия – α -твёрдый раствор меди в алюминии, включения – химическое соединение $CuAl_2$ (рисунок IV. 16,а).

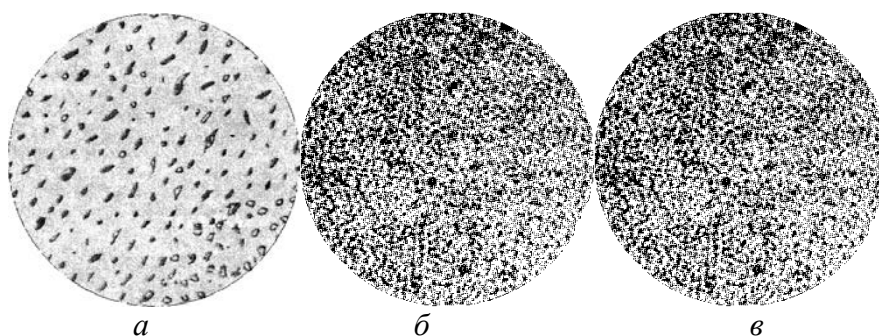


Рис. IV. 16. Микроструктуры дюралюмина (250°C)

а) после отжига; б) после закалки от 530°C ;
в) после закалки и искусственного старения при 250°C

При нагреве включения CuAl_2 (рис. IV.16,б) растворились в алюминии и быстрым охлаждением в воде зафиксирован пересыщенный α -твёрдый раствор. Видны зёрна пересыщенного α -твёрдого раствора. На рис. IV.16,в светлое поле – α -твёрдый раствор, включения – химическое соединение CuAl_2 . Включения химического соединения CuAl_2 выделились из α -твёрдого раствора в процессе искусственного старения.

Ковочные сплавы алюминия предназначены для производства деталей ковкой и штамповкой. По химическому составу они близки к дюралюмину, иногда отличаются более высоким содержанием кремния. Сплавы применяются после закалки и искусственного старения.

Светлые участки (рис. IV. 17,а) – твёрдый раствор компонентов в алюминии, тонкие линии – включения химического соединения CuAl_2 , тёмная составляющая – силицид магния Mg_2Si – β -фаза.

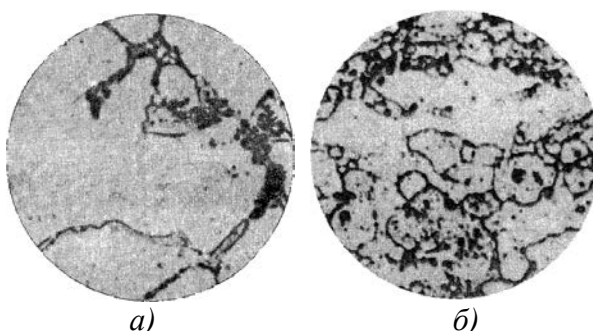


Рис. IV. 17. Микроструктуры ковочного алюминиевого сплава АК 8 (250°C)

а) сплав АК 8 до закалки; б) сплав АК 8 после закалки с 510°C и искусственного старения при 150°C в течение 12 часов

Светлые участки (рис. IV. 17,б) – алюминиевый твёрдый раствор, внутри зёрен и по границам заметны тёмные включения упрочняющих фаз типа Mg_2Si , $CuAl_2$.

Силумины – сплавы алюминия с кремнием обладают высокими литейными свойствами. Светлое поле у немодифицированного силумина (рис. IV. 18,а) – α -твёрдый раствор Si в Al , тёмные иглы – включения Si .

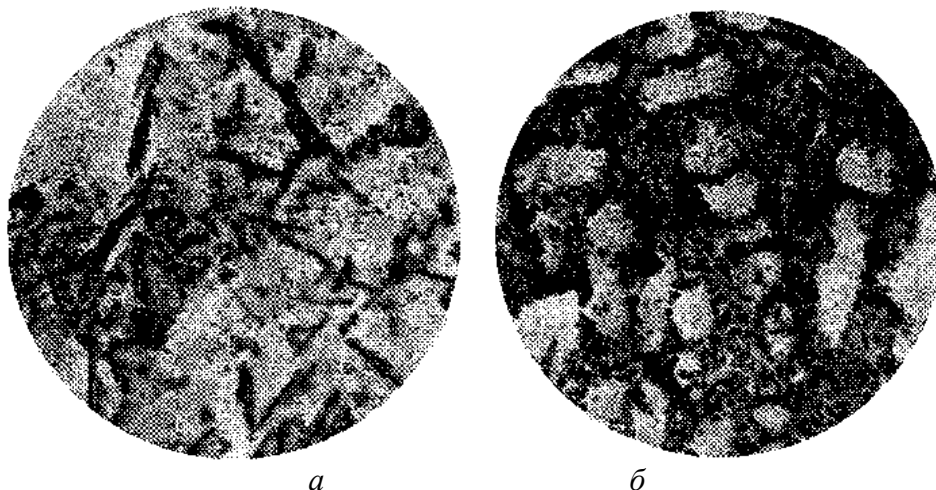


Рис. IV. 18. Микроструктуры силумина (200^x)

а) немодифицированный силумин; б) модифицированный силумин

Для повышения механических свойств, путем измельчения структуры, силумины модифицируют солями натрия. Светлое поле модифицированного силумина (рис. IV. 18,б) – α -твёрдый раствор кремния и других элементов в алюминии, остальное – мелкозернистая эвтектика ($Al-Si$) тонкого строения.

Силумин обладает хорошими литейными свойствами, а после модифицирования повышенными механическими свойствами: предел прочности 180МПа (18кгс/мм^2) против 140МПа (14кгс/мм^2) и $\delta \sim 8\%$ против 3% у немодифицированного.

Данные соединения выделяются по границам зерен, что снижает пластичность алюминия.

Сплавы на основе алюминия отличаются высокими механическими свойствами при малой плотности, что позволяет получить значительную удельную прочность. Количество легирующих элементов и их сочетание зависит от назначения сплава.

IV.1.5. Микроструктура меди и ее сплавов

Медь – тяжелый металл ($8,94 \text{ г/см}^3$) красного цвета. Температура плавления 1083°C . Медь кристаллизуется в гранецентрированную кубическую решетку с периодом $a = 0,3608 \text{ нм}$. После серебра медь обладает наибольшей теплопроводностью и электропроводностью, удельное электрическое сопротивление меди $0,0175 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Важное значение имеет степень чистоты меди, так как даже мизерное количество некоторых примесей может существенно снизить электротехнические свойства, ухудшить ее технологические свойства.

Медь, деформированная и затем отожжённая, имеет зернистую структуру с наличием двойников (рис. IV.19).



Рис. IV. 19. Микроструктура деформированной и отожжённой меди ($250\times$)

Медь характеризуется невысокой прочностью $\sigma_{\text{г}} = 150 \dots 250 \text{ МПа}$ ($\sigma_{\text{г}} = 15 \dots 25 \text{ кгс/мм}^2$) и твёрдостью HB60, хорошей пластичностью ($\delta = 50\%$) в горячедеформированном состоянии [14]. Обладает высокой электропроводностью, теплопроводностью, коррозионной стойкостью в пресной и морской воде.

Латуни содержат до 45% цинка. Они характеризуются высокой электропроводностью и теплопроводностью, коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием. По технологическому признаку делятся на деформируемые и литейные. В зависимости от микроструктуры различают однофазные α -латуни (содержат цинка до 39%) и двухфазные $\alpha + \beta$ -латуни (содержат цинка от 39% до 45%).

Микроструктура литой однофазной α -латуни имеет дендритное строение (рис. IV. 20,а). Светлые участки – дендриты богатые медью. Тёмные участки – междендритные пространства, обогащённые цинком.

Деформированная и отожжённая латунь имеет зернистое строение и характерные полосы двойников (рис. IV. 20,б). Вследствие анизотропии они травятся с различной интенсивностью и получают разную окраску.

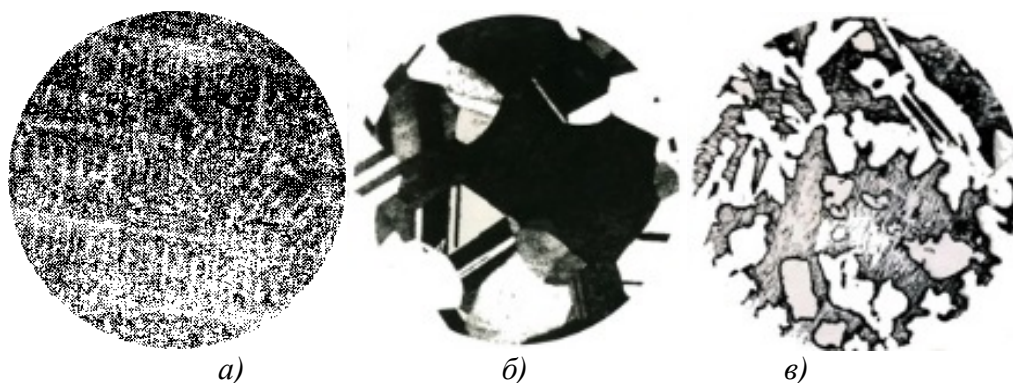


Рис. IV. 20. Микроструктуры латуни ($250\times$)

а) однофазная литая латунь; б) однофазная деформированная и отожжённая латунь;
в) двухфазная латунь

Светлые зёрна двухфазной латуни представляют собой α -фазу – твёрдый раствор Zn в Cu , с гранецентрированной кристаллической решёткой меди (рис. IV.20,в). Тёмные зерна β -фаза – упорядоченный твердый раствор на базе электронного соединения $CuZn$ с решёткой ОЦК.

Бронзами называются сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием и другими элементами, среди которых цинк не является основной добавкой. Бронзы обладают хорошими литейными и антифрикционными свойствами, высокой коррозионной стойкостью в пресной и морской воде, в газовой атмосфере при высоких температурах, имеют достаточно высокую пластичность. Хорошо обрабатываются давлением и резанием.

Литая оловянная бронза имеет дендритное строение. На микроструктуре (рис. IV.21,а) тёмные места – дендриты, более богатые медью, светлые – междоузельные пространства более богатые оловом.

Структура оловянной бронзы после отжига представляет собой однородные зёрна α -твердого раствора олова в меди – темная составляющая (рис. IV.21,б) и эвтектид – $\alpha + Cu_{31}Sn_8$ – светлая.

Оловянные бронзы обладают высокой коррозионной стойкостью, износостойкостью. Некоторые из них имеют пружинящие свойства, антифрикционные свойства, обрабатываются резанием, поддаются пайке и сварке.

Пластичность бронз растет до содержания олова 5%, а затем снижается, а твердость и прочность растёт постоянно.

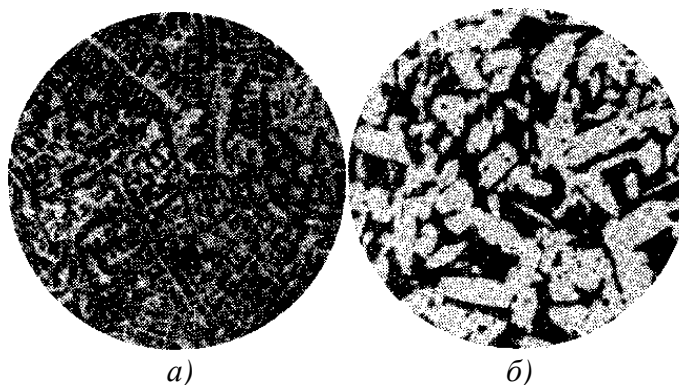


Рис. IV.21. Микроструктуры оловянной бронзы (340°)
а) оловянная бронза литая (5%Sn); б) оловянная бронза после отжига (10%Sn)

Алюминиевые бронзы обладают достаточно высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Упрочняются закалкой и старением. Твердость (HB), прочность (σ_b) и пластичность растут по мере увеличения содержания алюминия. Пластичность достигает максимума при 5% Al, затем быстро снижается. Поэтому из двухфазных бронз применяют бронзы, содержащие не более 11% Al.

Микроструктура однофазных бронз с различным содержанием алюминия и в том и другом случае представляет собой зерна α -твердого раствора алюминия в меди (рис. IV.22, а и б).

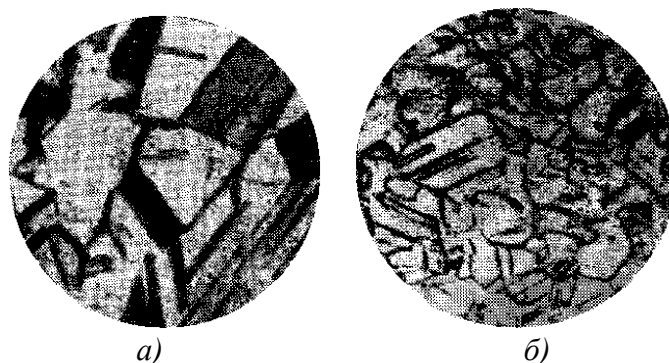


Рис. IV. 22. Микроструктуры алюминиевых однофазных бронз
а) BrA5 после деформации и отжига (230°); б) BrA8 после деформации и отжига (130°)

При содержании 10% Al и более образуется двухфазная бронза (рис. IV.23,а). Светлые участки – α -фаза, темные – эвтектоид $\alpha+\gamma'$, (γ' -электронные соединения $Cu_{32}Al_{19}$).

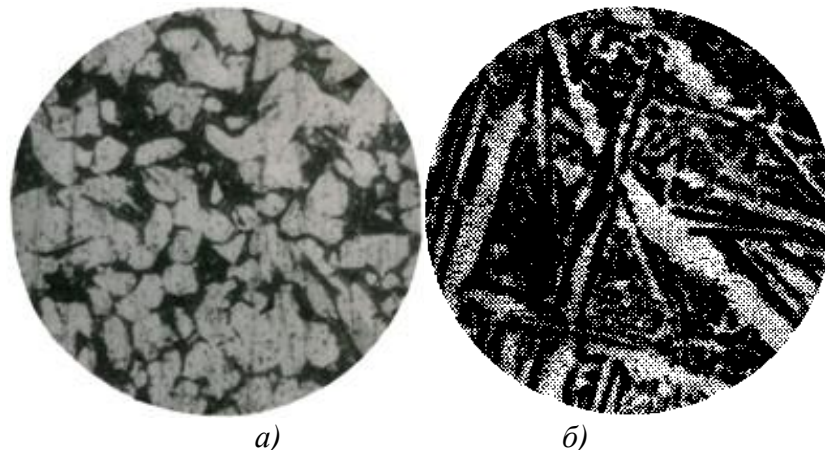


Рис. IV. 23. Микроструктуры алюминиевой двухфазной бронзы (x250)
а) в литом состоянии; б) алюминиевая бронза с 10,2% Al после закалки

При нагреве двухфазной бронзы эвтектоид $\alpha+\gamma'$ превращается в β -твердый раствор (твердый раствор на основе соединения Cu_3Al электронного типа), а после охлаждения образуется игольчатая структура подобная структуре мартенсита (рис. IV.23,б).

На рисунке свинцовистой бронзы основной белый фон – медь, тёмные включения – свинец (рис. IV.24,а). Включения свинца располагаются по границам зёрен или заполняют междендритные пространства. Свинец не растворяется полностью в жидкой меди. Свинцовистые бронзы обладают высокими антифрикционными свойствами и применяются в подшипниках скольжения.

Бериллиевые бронзы применяются в основном после закалки и старения. Они отличаются высокой твердостью, прочностью, упругостью и износостойкостью. Достоинством являются также красивый золотистый цвет и сопротивляемость коррозии.

Светлое поле бериллиевой бронзы α -твердый раствор бериллия в меди (видны границы зерен). На фоне зерен α -твердого раствора видны мелкие твердые включения γ -фазы ($CuBe$), упрочняющие бронзу при старении (рис. IV.24,б).

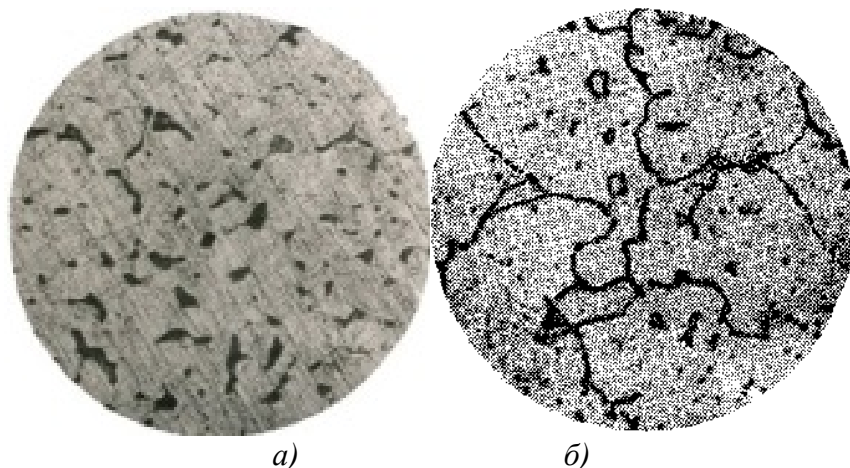


Рис. IV. 24. Микроструктуры бронз (250^х)

а) свинцовистая бронза; б) бериллиевая бронза после закалки и старения

§ IV.2. Современные методы, средства и технологии исследования металлов и сплавов

IV.2.1. Рентгеноструктурный анализ и рентгеновская дефектоскопия

Рентгеновские лучи имеют ту же природу, что и световые лучи, и представляют собой электромагнитные колебания, с длиной их волн от $2 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-9} см (длина световых лучей от $7,5 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-5}$ см). Очевидно, что если бы существовали «рентгеновские металлографические микроскопы», то можно было бы на «рентгеновских изображениях» увидеть детали микроструктуры металлов и сплавов в сто раз более мелкие, так как разрешающая способность оптических микроскопов ограничивается длиной световых лучей, которая, как мы видим на два порядка больше, чем длина волны рентгеновского излучения. Однако, в природе не существует материалов из которых можно бы было изготовить линзы, способные фокусировать рентгеновские лучи, поэтому «рентгеновские микроскопы» создать невозможно [15]. Вместе с тем, это не означает, что рентгеновские лучи нельзя использовать для исследования структурных особенностей материалов и сплавов.

Рентгеновские лучи получаются в рентгеновских трубках в результате торможения электронов при их столкновении с поверхностью какого-либо

металла. При этом кинетическая энергия электронов превращается в энергию рентгеновских лучей.

Рентгеноструктурный анализ основан на способности атомов отражать рентгеновские лучи в кристаллической решётке. Отражённые лучи оставляют на фотопластинке (рентгенограмме) группу пятен или колец. По характеру их расположения определяют тип кристаллической решётки, а также расстояние между атомами (положительными ионами) в решётке [16].

Рентгеновское просвечивание основано на способности рентгеновских лучей проникать в глубину тела. Благодаря чему можно, не разрезая металлических изделий, увидеть на рентгеновском снимке различные внутренние дефекты металла (усадочные раковины, трещины, пороки сварки).

Методы регистрации пороков в материале основаны на том, что рентгеновские лучи частично поглощаются, проходя через металл. При этом, менее плотные части металлического изделия (участки с пороками) поглощают лучи слабее, чем плотные (сплошной металл). Это приводит к тому, что на рентгеновском снимке участки с пороками будут иметь тёмные или светлые пятна на фоне сплошного металла.

Современные рентгеновские аппараты позволяют просвечивать стальные изделия на глубину до 60 – 100 мм.

Для выявления дефектов в металлических изделиях большой толщины применяют гамма-лучи. Природа гамма-лучей аналогична рентгеновским лучам, но длина их волн меньше. Благодаря большой проникающей способности гамма-лучей ими можно просвечивать стальные детали толщиной до 300 мм.

Рентгеновский анализ служит для изучения кристаллической структуры металлов. Этот метод основан на дифракции рентгеновских лучей рядами атомов кристаллической решетки. Рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные волны с длиной волны $0,0005 \div 0,2$ нм. Благодаря малой длине волны эти лучи возбуждают электроны атомов или ионов,

находящихся в узлах кристаллической решетки. Поэтому атомы и ионы сами становятся источниками электромагнитных колебаний. Лучи, рассеянные отдельными атомами или ионами, взаимодействуют (интерферируют) между собой. Вследствие упорядоченного расположения атомов в кристалле интерференция рассеянного излучения происходит таким образом, что в одних направлениях колебания усиливаются, в других ослабляются и гасятся. Возникающая интерференционная картина может быть истолкована как отражение лучей от отдельных кристаллографических плоскостей, подчиняющееся уравнению Вульфа-Брегга.

$$2d \sin \delta = n\lambda, \quad (IV.6)$$

где n - простое число ($1, 2, 3, \dots, n$);

λ - длина волны первичных рентгеновских лучей;

d - межплоскостное расстояние;

δ - угол падения луча на кристаллографическую плоскость;

Разработано много методов рентгеновского анализа. Наиболее часто используют метод Дебая-Шерера для исследования поликристаллических образцов и метод Лауэ для анализа монокристаллов.

Сущность метода Дебая-Шерера заключается в том, что на поликристаллический образец, который обычно переводится в порошкообразное состояние, направляется пучок монохроматических (имеющих одну длину волны) рентгеновских лучей. Среди множества мелких кристалликов порошкообразного образца всегда найдутся такие, которые ориентированы по отношению к первичному лучу так, что для них удовлетворяется уравнение Вульфа-Брегга. Это значит, что определенные плоскости этих кристаллов будут отражать рентгеновский луч с данной длиной волны. Лучи, отраженные одноименными плоскостями, образуют конус, осью которого является первичный падающий луч. Если на некотором расстоянии от образца поставить фотопленку, то на ней изобразится система концентрических окружностей, каждая из которых является отражением от определенного семейства плоскостей. Обычно изображение получают на

узкой пленке, согнутой в кольцо. Тогда на рентгенограмме, называемой *дебаеграммой*, получают серию попарно симметричных дуг, являющихся частью окружности. Зная длину волны и измерив углы, при которых наблюдается отраженный луч, можно из уравнения Вульфа-Брегга определить межплоскостные расстояния, а затем и параметры решетки. Если в образце присутствуют кристаллы нескольких разных типов, т. е. имеющие разные кристаллографические структуры, то на *дебаеграмме* будет соответственно несколько систем линий. Именно по этому признаку, устанавливаемому при расшифровке *дебаеграмм*, и судят о том, имеет ли образец одно- или многофазное строение [17].

Рентгеноструктурный анализ позволяет также установить, представляет ли собой образец чистое вещество или является твердым раствором на основе данного вещества. При образовании твердых растворов тип кристаллической структуры сохраняется, но от присутствия атомов растворенного элемента параметры кристаллической решетки основы-растворителя меняются - уменьшаются или увеличиваются. Точное определение параметров решетки (до $1 \cdot 10^{-5}$ нм) позволяет однозначно ответить на данный вопрос.

Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах была открыта в 1912г. немецкими физиками М. Лауэ, В. Фридрихом и П. Книппингом. Направив узкий пучок рентгеновских лучей на неподвижный кристалл, они зарегистрировали на помещенной за кристаллом фотопластинке дифракционную картину, которая состояла из большого числа закономерно расположенных пятен. Каждое пятно — след дифракционного луча, рассеянного кристаллом.

Основными методами рентгеновской съемки кристаллов являются:

- метод Лауэ;
- метод порошка (*метод дебаеграмм*);
- метод вращения и его разновидности ÷ *метод качания*.

Метод Лауэ заключается в том, что на монокристаллический образец направляют пучок полихроматического, т. е. имеющего разные длины волн излучения. Это излучение называют белым. На плоском экране, помещенном за образцом, возникает система дифракционных пятен, каждое из которых является результатом отражения луча от определенной плоскости (рис. IV.25,а). Белое излучение необходимо для того, чтобы каждая плоскость кристалла могла встретить "свой" луч, удовлетворяющий уравнению Вульфа-Брегга. По взаимному расположению пятен определяют характер кристаллической решетки, ориентацию кристалла в пространстве по отношению к падающему лучу. Рентгенограмма, полученная таким методом, носит название *лауэграммы* (рис. IV.25,б). Пятна располагаются по эллипсам, гиперболам и прямым, обязательно проходящим через пятно от первичного пучка. Важное свойство *лауэграммы* состоит в том, что при соответствующей ориентировке кристалла симметрия расположения этих кривых отражает симметрию кристалла.

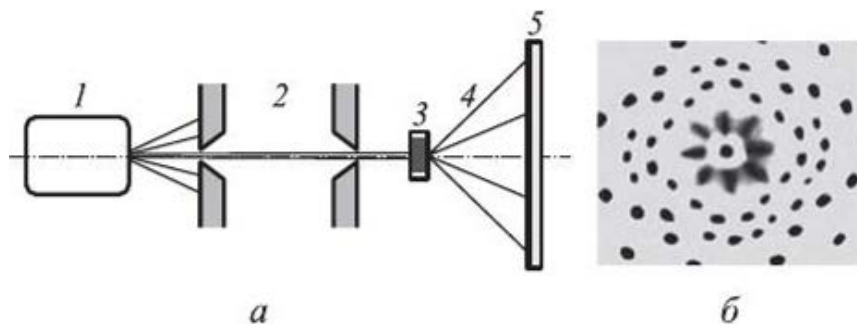


Рис. IV.25. Рентгеновская съемка по методу Лауэ: а - схема облучения; б - типичная лауэграмма; 1 - пучок рентгеновских лучей; 2 - коллиматор; 3 - образец; 4 - дифрагированные лучи; 5 - плоская фотопленка

По характеру пятен на *лауэграммах* можно выявить внутренние напряжения и другие дефекты кристаллической структуры. Индицирование же отдельных пятен затруднительно. Поэтому метод Лауэ применяют исключительно для нахождения нужной ориентировки кристалла и определения его элементов симметрии. Этим методом проверяют качество монокристаллов при выборе образца для более полного структурного исследования.

При использовании *метода порошка* (рис. IV.26,а), так же как и в описываемых далее методах рентгеновской съемки, применяется монохроматическое излучение. Переменным параметром является угол падения θ° , так как в поликристаллическом порошковом образце всегда присутствуют кристаллики любой ориентации по отношению к направлению первичного пучка.

Лучи от всех кристалликов, у которых плоскости с некоторым межплоскостным расстоянием d_{hkl} находятся в «отражающем положении», т. е. удовлетворяют условию Вульфа—Брэгга, образуют вокруг первичного луча конус с углом раstra 40° . Каждому d_{hkl} соответствует свой дифракционный конус. Пересечение каждого конуса дифрагированных рентгеновских лучей с полоской фотопленки, свернутой в виде цилиндра, ось которого проходит через образец, приводит к появлению на ней следов, имеющих вид дужек, расположенных симметрично относительно первичного пучка (рис. IV.26,б). Зная расстояния между симметричными «дугами», можно вычислить соответствующие им межплоскостные расстояния d в кристалле.

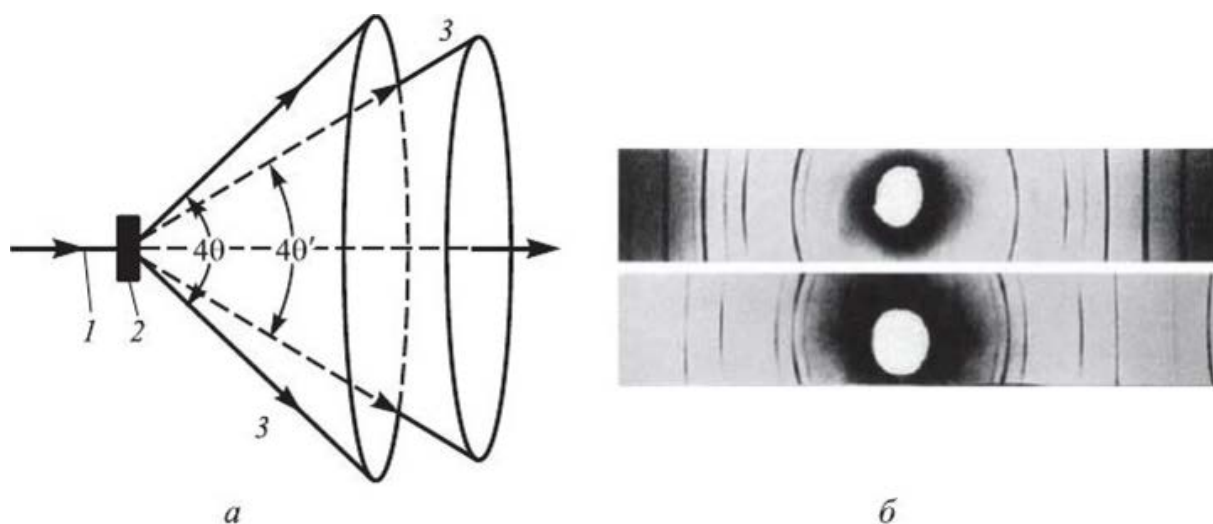


Рис. IV.26. Рентгеновская съемка методом порошка: а — схема метода; б — типичные порошковые рентгенограммы (дебиеграммы); 1 — первичный пучок; 2 — порошковый или поликристаллический образец; 3 — дифракционные конусы

В современных приборах вместо свернутой по цилиндрической поверхности фотопленки используют датчик с малой апертурой и площадью

приемного окна, который дискретно перемещают по цилиндрической поверхности, снимая *дифрактограмму*.

Метод порошка наиболее прост и удобен с точки зрения техники эксперимента, однако единственная поставляемая им информация - выбор межплоскостных расстояний - позволяет расшифровывать только самые простые структуры.

В *методе вращения* переменным параметром является угол θ° . Съемка производится на цилиндрическую фотопленку. В течение всего времени экспозиции кристалл равномерно вращается вокруг оси, совпадающей с каким-либо важным кристаллографическим направлением и осью образуемого пленкой цилиндра. Дифракционные лучи идут по образующим конусов, которые при пересечении с пленкой дают линии, состоящие из пятен (*слоевые линии*).

Метод вращения дает больше информации, чем метод порошка. По расстояниям между слоевыми линиями можно рассчитать период решетки в направлении оси вращения кристалла.

В этом методе упрощается идентификация пятен рентгенограммы. Так, если кристалл вращается вокруг оси решетки, то все пятна на линии, проходящей через след первичного луча, имеют индексы (A, k, O) , на соседних с ней слоевых линиях - соответственно (A, k, I) и (A, A, I) и т. д. Однако и метод вращения не предоставляет всей возможной информации, поскольку неизвестно, при каком угле поворота кристалла вокруг оси вращения образовалось то или иное дифракционное пятно.

При исследовании *методом качания*, который является разновидностью метода вращения, образец не совершает полного вращения, а «качается» вокруг той же оси в небольшом угловом интервале. Это облегчает индицирование пятен, так как позволяет получать рентгенограмму вращения по частям и определять с точностью до величины интервала качания, под каким углом поворота кристалла к первичному пучку возникло каждое дифракционное пятно.

Еще более полную информацию дают методы рентгеногониометра. *Рентгеновский гониометр* — это прибор, с помощью которого одновременно регистрируют направление дифрагированных на исследуемом образце рентгеновских лучей и положение образца в момент возникновения дифракции.

Один из таких методов — *метод Вайссенберга* — является дальнейшим развитием метода вращения. В отличие от последнего в рентгеногониометре Вайссенберга все дифракционные конусы, кроме одного, закрываются цилиндрической ширмой, а пятна оставшегося дифракционного конуса «разворачиваются» на всю площадь фотопленки путем ее возвратно-поступательного осевого перемещения синхронно с вращением кристалла. Это позволяет определить, при какой ориентации кристалла возникло каждое пятно *вайссенбергограммы*.

Существуют и другие методы съемки, в которых применяется одновременное синхронное движение образца и фотопленки. Важнейшими из них являются *метод фотографирования обратной решетки* и *прецессионный метод Бюргера*. При этом используется фотографическая регистрация дифракционной картины. В рентгеновском дифрактометре можно непосредственно измерять интенсивность дифракционных отражений с помощью пропорциональных, сцинтилляционных и других счетчиков рентгеновских квантов.

Рентгеноструктурный анализ дает возможность устанавливать структуру кристаллических веществ, в том числе таких сложных, как биологические объекты, координационные соединения и т. д. Полное структурное исследование кристалла часто позволяет решать и чисто химические задачи, например, установление или уточнение химической формулы, типа связи, молекулярной массы при известной плотности или плотности при известной молекулярной массе, симметрии и конфигурации молекул и молекулярных ионов.

Применяется РСА и для изучения кристаллического состояния полимеров, аморфных и жидких тел. Рентгенограммы таких образцов содержат несколько размытых дифракционных колец, интенсивность которых резко снижается с увеличением угла падения θ . По ширине, форме и интенсивности этих колец делают заключение об особенностях ближнего порядка в жидкой или аморфной структуре.

Важной областью применения рентгеновских лучей является рентгенография металлов и сплавов, которая стала отдельной отраслью науки. Рентгенография включает наряду с полным или частичным РСА также и другие приемы использования рентгеновских лучей: *рентгеновскую дефектоскопию* (просвечивание), *рентгеноспектральный анализ*, *рентгеновскую микроскопию* и др.

В настоящее время разработаны методики, позволяющие решать более сложные задачи: определять величину блоков в кристаллах, их разориентировку, микронапряжения, степень текстуры в поликристаллических объектах и т.д.

Создана целая серия приборов (*рентгеновских дифрактометров*) для исследования металлов и сплавов один из которых приведен на *рисунке IV.27*.



Рис. IV.27. Рентгеновский дифрактометр

Следует отметить, что рентгеновские лучи очень широко используют для просвечивания металлических изделий с целью обнаруживания внутренних пороков (трещин, пустот, раковин, включений). В этом случае используют белое излучение большой мощности.

IV.2.2. Электронная микроскопия

Значительно большее увеличение можно получить при помощи электронного микроскопа, в котором лучи света заменены потоком электронов (при этом достигается увеличение до *100 000 раз*).

Электронная микроскопия была разработана в первую очередь для повышения разрешающей способности микроскопических исследований. Формально пучок электронов, летящих в электростатическом поле с напряжением $40 \div 100$ кВ, может рассматриваться как излучение с длиной волны, составляющей доли ангстрема. Поскольку длина волны видимого света в среднем равна $0,55$ мкм (550 нм), то использование излучения с намного меньшей длиной волны резко повышает разрешающую способность и практически позволяет довести разрешение до $0,5 \div 1$ нм против $200 \div 300$ нм, присущих оптическим микроскопам.

По характеру исследований, для которых предназначаются электронные микроскопы, они подразделяются на просвечивающие (трансмиссионные) и микроскопы для прямого исследования массивных объектов (растровые или сканирующие, эмиссионные, зеркальные). Наиболее распространены электронные микроскопы просвечивающего типа, что объясняется, прежде всего, их высокой разрешающей способностью.

IV.2.2.1. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

(англ. TEM - Transmission electron microscopy)

В просвечивающих электронных микроскопах (ПЭМ) поток электронов проходит через изучаемый объект. Для исследования металлографических объектов в электронном микроскопе просвечивающего типа используются прямой и косвенный методы.

Прямой метод заключается в исследовании очень тонких слоев металла (фольг), прозрачных для пучка электронов. Этим методом удается обнаружить различные дефекты в кристаллической решетке, главным образом дислокации.

Косвенные методы исследования структуры осуществляются с помощью отпечатков-реplik, которые воспроизводят рельеф поверхности шлифа. Реплики получают нанесением на поверхности шлифа раствора фотопленки в амилцетате или путем напыления угля в вакууме. Полученная тем или иным способом реплика отделяется от шлифа при погружении образцов в травящий раствор, после чего ее помещают в электронный микроскоп.

При прохождении электронного луча через реплику благодаря неодинаковому рассеянию электронов в разных ее участках на экране электронного микроскопа воспроизводится рельеф поверхности шлифа. Разрешение, достигаемое на репликах, составляет от нескольких десятков до нескольких сотен ангстремов. Контраст, получаемый с помощью реплик, называют контрастом за счёт «*эффективной толщины*».

При *прямом методе* изучают тонкие металлические фольги толщиной до 300 нм, на просвет. Фольги получают непосредственно из изучаемого металла. Изображение является результатом дифракции электронов на объекте, а контраст, получаемый на изображении, называют дифракционным.

Большинство электронных просвечивающих микроскопов может работать в режиме *электронографа*. При этом электроны с помощью магнитных линз собираются в очень узкий пучок, который наводится на обнаруженную заранее деталь структуры. Получающаяся дифракционная картина подобна той, которая возникает при рентгеновском анализе по методу Лауэ.

По *электронограмме* можно определить кристаллографические параметры очень мелких частиц и тонких пленок, которые не поддаются

рентгеноструктурному анализу из-за соизмеримости длин волн рентгеновского излучения и геометрических размеров частиц и пленок.

Таким образом, для изучения микроструктуры в *просвечивающем электронном микроскопе*, также как и при исследовании микроструктуры с помощью оптического микроскопа, приготавливаются шлифы (микрошлифы). Здесь, после шлифования дополнительно производится полирование до зеркального блеска, затем производят травление шлифа, затем снимают с поверхности микрошлифа «реплику» и изучают её в электронном микроскопе. Такое исследование позволяет выявить:

- величину, форму и расположение зёрен;
- отдельные структурные составляющие сплава, на основании которых можно определить химический состав, например, отожженных углеродистых сталей;
- качество тепловой обработки (например, глубину проникновения закалки);
- различные дефекты (пережог, обезуглероживание, наличие неметаллических включений).

Просвечивающая электронная микроскопия является одним из самых высокоразрешающих методов исследования. В определённом смысле, просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) представляет собой аналог традиционного оптического микроскопа. Аналогия заключается в том, что изменение траектории распространения потока оптических квантов под действием преломляющей среды (линз) подобно действию магнитных и электрических полей на траекторию движения заряженных частиц, в частности электронов. Подобие, с точки зрения фокусировки электронов и формирования изображения исследуемого объекта, оказалось настолько близким, что электронно-оптические колонны первых магнитных и электростатических ПЭМ рассчитывали с помощью зависимостей геометрической оптики [18,19].

В качестве фокусирующих линз в современных ПЭМ (рис. IV.28) используют заключенные в магнитопровод электромагнитные катушки, которые создают фокусирующие магнитостатические поля.

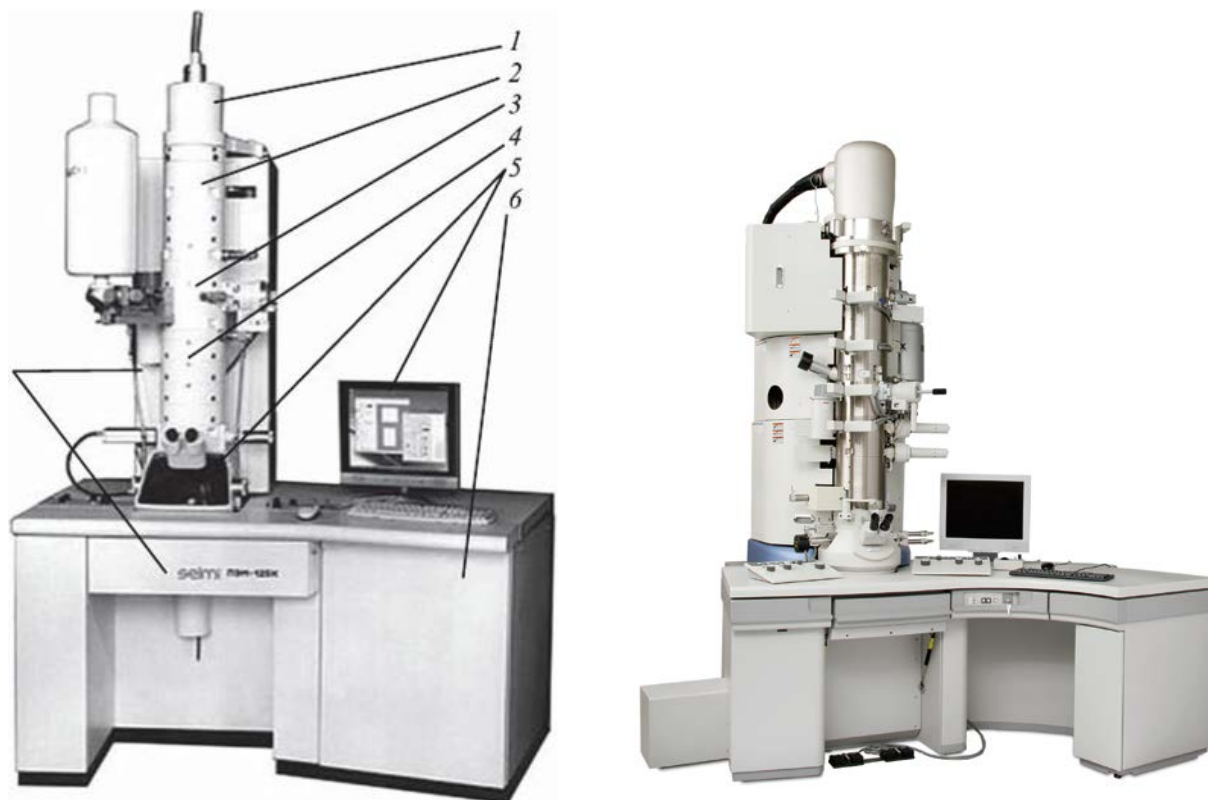


Рис. IV.28. Просвечивающий электронный микроскоп:

- 1 — электронная пушка; 2 — блок конденсорных линз; 3 — блок объективной линзы с объектодержателем; 4 — блок проекционных линз; 5 — экраны для визуализации изображения; 6 — высоковольтный источник питания; 7 — вакуумная система

Магнитные линзы обеспечивают фокусирующую способность и возможность формирования изображения, наиболее точно соответствующего объекту. В отличие от стеклянных линз преломляющую силу магнитной линзы легко меняют путем изменения тока возбуждения в обмотке. Благодаря этому увеличение, обеспечиваемое микроскопом, можно менять непрерывно от нескольких сотен до миллионов крат.

Принципиальная схема ПЭМ показана на рис. IV.29. Микроскоп состоит из электронной пушки и системы электромагнитных линз, образующих вертикально расположенную электронно-оптическую колонну, в которой поддерживается вакуум 10^{-7} мм.рт.ст. Осветительная система микроскопа включает в себя электронную пушку и двухлинзовый

конденсатор. Электронная пушка, как правило, термоэмиссионная, состоит из катода (нагретая нить из W или LaB_6), эмиттирующего электроны, управляющего электрода (на него подается отрицательный относительно катода потенциал) и анода в виде пластинки с отверстием. Между катодом и анодом создается мощное электрическое поле с ускоряющим напряжением $100\div 150$ кВ. Следует заметить, что существует немногочисленный класс так называемых *сверхвысоковольтных микроскопов*, в которых ускоряющее напряжение может достигать нескольких *мегавольт*.

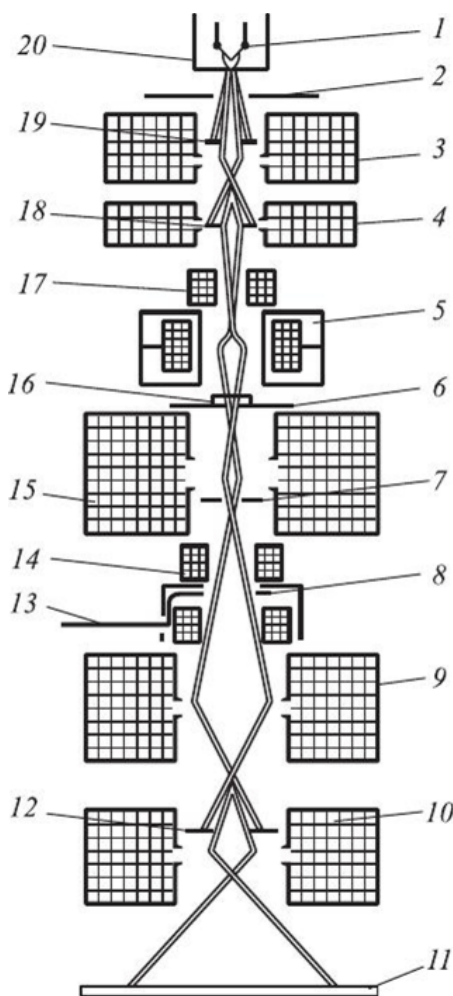


Рис. IV. 29. Схема просвечивающего электронного микроскопа:

- 1 — катод; 2 — анод; 3 — первый конденсор; 4 — второй конденсор;
- 5 — корректор юстировки; 6 — гониометрический столик с объектодержателем;
- 7 — апертурная диафрагма; 8 — секторная диафрагма; 9 — промежуточная линза;
- 10 — проекционная линза; 11 — приемник-преобразователь;
- 12 — диафрагма поля зрения; 13 — стигматор промежуточной линзы;
- 14 — стигматор объективной линзы; 15 — объективная линза;
- 16 — исследуемый объект; 17 — стигматор второго конденсора;
- 18 — диафрагма второго конденсора; 19 — диафрагма первого конденсора; 20 — управляющий электрод

С увеличением скорости уменьшается длина волны электрона ($\lambda = h/mv = h/(2meU)^{1/2}$). С уменьшением длины волны возрастает разрешающая способность оптической системы любого микроскопа, в том числе и ПЭМ.

Рост ускоряющего напряжения, кроме того, приводит к увеличению проникающей способности электронов. При рабочих напряжениях 1000 кВ и более возможно изучение образцов толщиной до $5 \div 10$ мкм.

Проходя через отверстие анода, пучок электронов попадает в конденсоры и корректор юстировки, где электронный луч окончательно наводится на изучаемый образец. В ПЭМ посредством конденсорных линз регулируют и контролируют размер и угол облучения образца. Далее с помощью полей объективной и проекционных линз на поверхности приемника - преобразователя формируется информационное изображение.

Для микродифракционных исследований в состав микроскопа включают подвижную селекторную диафрагму, которая в этом случае заменяет апертурную. Для большей универсальности между объективной и промежуточной линзами в ПЭМ устанавливают дополнительную линзу. Она повышает резкость изображения во всем диапазоне увеличений. Основное же назначение линзы состоит в обеспечении быстрого перехода в режим электронографических исследований.

В качестве приемника-преобразователя может использоваться люминесцентный экран, где в слое люминофора происходит преобразование потока электронов в поток оптического излучения.

В другом конструктивном исполнении приемник-преобразователь включает в себя чувствительную матрицу (секционированные микроканальные пластины, матричные электронно-оптические преобразователи, ПЗС-матрицы (сокр. от «прибор с зарядовой связью»)), в которой поток электронов преобразуется в видеосигнал, а последний выводится на экран монитора и используется для создания ТВ-изображения.

Современные ПЭМ обеспечивают разрешение до 0,2 нм (2 \AA). В связи с этим появился термин «просвечивающая электронная микроскопия

высокого разрешения». Полезное увеличение конечного изображения может достигать 1 млн. крат. Интересно отметить, что при таком огромном увеличении деталь структуры размером 1 нм (10Å°) на конечном изображении имеет размер только 1 м.м. Однако при исследовании материалов в высоковольтном ПЭМ нужно учитывать образование в его структуре радиационных дефектов типа пар Френкеля и даже комплексов точечных дефектов (дислокационных петель, вакансионных пор) при длительном экспонировании под влиянием высокоэнергетического электронного пучка.

Например, в алюминии пороговая энергия смещения атома из узла кристаллической решетки для электронного пучка составляет 166 эВ . Тогда такие электронные микроскопы являются эффективным инструментом для изучения появления и эволюции радиационных дефектов в кристаллических твердых телах.

Особенности формирования контраста в ПЭМ

В ПЭМ образцы «рассматривают» на просвет. То есть их облучают электронным пучком и получают нужную информацию в виде изображения, сформированного с помощью прошедших сквозь образец электронов.

Всякое изображение состоит из участков определенного размера, отличающихся яркостью. Эти отличия в ПЭМ возникают из-за того, что электроны, проходя сквозь плотную среду образца, рассеиваются в ней (частично поглощаются, изменяют направление движения и, как правило, теряют часть своей энергии). Причем угловое распределение электронов, прошедших сквозь образец, несет информацию о плотности образца, его толщине, элементном составе и кристаллографических характеристиках.

Так, участки, содержащие более тяжелые атомы, рассеивают электроны на большие углы и вызывают более эффективное их поглощение (*рис. IV.30*).

Точно так же участки аморфного образца, имеющие большую толщину, в большей степени отклоняют и поглощают электроны, чем более тонкие участки (*рис. IV.31*).

Если с помощью линз оптически совместить плоскость образца и плоскость приемника-преобразователя, на поверхности последнего возникнет увеличенное изображение.

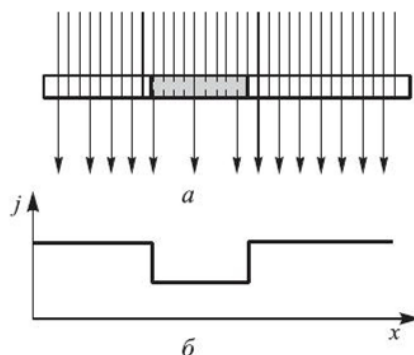


Рис. IV.30. Поглощение потока электронов в тонкопленочном аморфном образце, имеющем участок повышенной плотности:

a — прохождение потока электронов сквозь образец; *б* — распределение плотности тока j в прошедшем сквозь образец электронном потоке

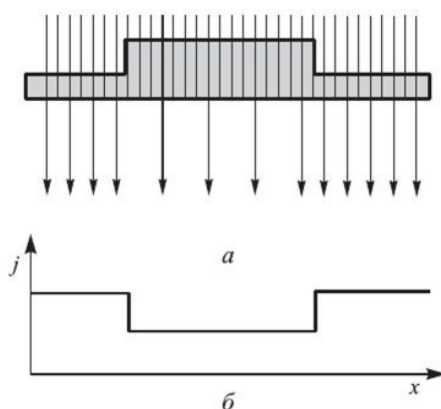


Рис. IV.31. Поглощение потока электронов в тонкопленочном аморфном образце переменной толщины:

a — прохождение потока электронов сквозь образец; *б* — распределение плотности тока j в прошедшем сквозь образец электронном потоке

Если образец является кристаллом или поликристаллом, взаимодействие электронного пучка, представляющего собой плоскую волну, с кристаллической решеткой приводит к возникновению дифракционной картины (рис. IV.32). Геометрия этой картины описывается известным из курса физики уравнением Вульфа-Брэгга и однозначно связана с кристаллографическими параметрами образца. Зная энергию облучающих электронов, можно установить эти параметры с высокой точностью. Для того чтобы получить увеличенное изображение такой картины (дифрактограммы), достаточно оптически сопрячь плоскость формирования

дифракционной картины (она располагается за плоскостью образца) и плоскость приемника-преобразователя.

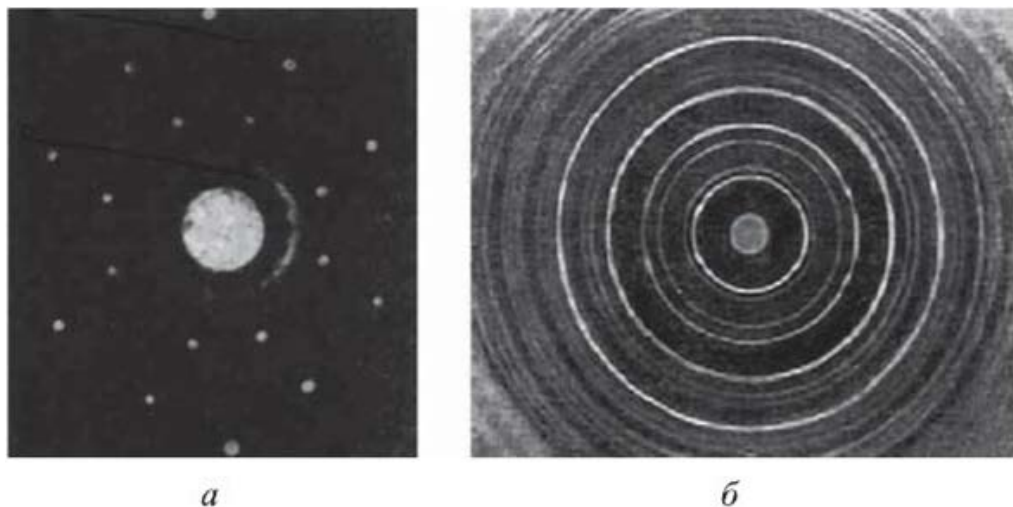


Рис. IV.32. Электронографические картины, полученные от монокристаллического (а) и поликристаллического (б) образцов

Для визуализации указанных изображений прошедшие электроны фокусируют на поверхности приемника-преобразователя с помощью системы линз (объективной, промежуточной и т. п.). При этом из всех электронов, прошедших через образец, выделяют либо электроны, рассеянные на большие углы, либо нерассеянные (реже для формирования изображения используют электроны, рассеянные на малые углы, — обычно при *малоугловой дифракции*). В первом случае на полученном изображении более темными выглядят участки, характеризующиеся малой рассеивающей способностью (это так называемый *темнопольный режим* формирования изображения), а во втором — наоборот (*светлопольный режим*).

Поскольку изображение формируется из электронов, прошедших сквозь образец, последний из-за низкой проникающей способности электронов должен иметь малую толщину (обычно десятые и сотые доли микromетра). Существует эмпирическое правило, согласно которому толщина образца не превышает значения требуемой разрешающей способности более чем на порядок (для получения сверхвысокого разрешения $0,2\text{ нм}$ это правило уже не работает). Вследствие этого образец готовят в виде фольги или тонкой пленки, называемой *репликой*.

В зависимости от того, как образец готовится, его исследование может быть прямым, косвенным или смешанным.

Прямой метод дает наиболее полную информацию о структуре объекта. Он заключается в утонении исходного массивного образца до состояния тонкой пленки, которая прозрачна или полупрозрачна для электронов.

Утонение образца — трудоемкий процесс, поскольку применение механических устройств на последней стадии невозможно. Обычно образец разрезают на миллиметровые пластинки, которые предварительно механическим путем полируют до толщины ~ 50 мкм. Затем образец подвергают прецизионному ионному травлению или электролитической полировке (двусторонней или с обратной стороны от исследуемой поверхности). В результате он утоняется до толщины $\sim 100 \div 1000$ Å.

Если образец имеет сложный состав, то надо учитывать, что скорость эрозии различных материалов при ионном распылении и электрополировке различна. В итоге получаемый слой дает прямую информацию не обо всем исходном образце, а лишь о чрезвычайно тонком его приповерхностном слое, оставшемся после травления.

Однако эта ситуация не критична, если сам образец представляет собой тонкую структуру, например, выращенную эпитаксиальную пленку или нанодисперсный порошок.

В некоторых случаях, относящихся, как правило, к неметаллическим пластичным материалам типа органики и биологических объектов, тонкие пленки для исследований отрезают от массивного исходного образца с помощью специальных устройств, называемых ультрамикротомом (рис. IV.33).

Ультрамикротом представляет собой миниатюрную гильотину с прецизионным (обычно пьезокерамическим) приводом перемещения образца под нож. Толщина слоя, срезаемого прибором, может составлять единицы нанометров.



Рис. IV.33. Ультрамикротом

В ряде случаев пленки получают также путем физического напыления в вакууме на водорастворимые подложки ($NaCl$, KCl).

При исследованиях методом просвечивающей электронной микроскопии можно изучать дислокационную структуру материалов, определять векторы Бюргерса дислокаций, их тип и плотность. Также с помощью ПЭМ возможно исследование скоплений точечных дефектов (в том числе и радиационных), дефектов упаковки (с определением их энергии образования), двойниковых границ, границ зерен и субзерен, выделений вторых фаз (с идентификацией их состава) и т. д.

Иногда микроскопы снабжают специальными приставками (для нагрева или растяжения образца в процессе исследования и пр.). Например, при использовании приставки, позволяющей растягивать фольгу в процессе исследования, наблюдают эволюцию дислокационной структуры при деформации.

При исследовании методом ПЭМ возможно проведение и *микродифракционного анализа*. В зависимости от состава материала в зоне изучения получают *электронограммы* в виде точек (образцы — монокристаллы или поликристаллы с зерном, превышающим зону исследования), сплошные или состоящие из отдельных рефлексов. Расчет таких *электронограмм* аналогичен расчету *рентгеновских дебаеграмм*. С

помощью микродифракционного анализа можно также определять ориентировки кристаллов и разориентировки зерен и субзерен.

Просвечивающие электронные микроскопы с очень узким лучом позволяют по спектру энергетических потерь электронов, прошедших через изучаемый объект, проводить локальный химический анализ материала, в том числе анализ на легкие элементы (бор, углерод, кислород, азот).

Косвенный метод связан с исследованием не самого материала, а тонких пленочных реплик, получаемых с его поверхности. На образце формируют тонкую пленку, до мельчайших подробностей повторяющую поверхностную структуру образца, и затем ее отделяют с помощью специальных методик (рис. IV.34).

Метод реализуют либо напылением в вакууме на поверхность образца пленки углерода, кварца, титана или других веществ, которую потом сравнительно просто отделяют от образца, либо оксидируют поверхность (например, медь), получая легкоотделяемые оксидные пленки. Еще более перспективно использование реплик в виде полимерных или лаковых пленок, наносимых в жидком виде на поверхность шлифа.

Для косвенного метода не требуются дорогостоящие высоковольтные микроскопы. Однако он значительно уступает прямому методу в информативности. Во-первых, исключается возможность исследовать кристаллографические характеристики образца, а также оценивать особенности его фазового и элементного состава.



Рис. IV.34. Схема создания реплики методом осаждения для исследований с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Во-вторых, разрешение получаемого изображения обычно хуже. Полезное увеличение таких изображений ограничено точностью самой реплики и достигает в лучшем случае (для углеродных реплик) $(1\div 2)\times 10^5$.

Кроме того, возможно появление искажений и артефактов в процессе изготовления самой реплики и отделения ее от исходного образца. Все это ограничивает применение метода.

Отметим, что метод осаждения тонкого слоя на поверхность образца применяется и при прямом исследовании утоненных объектов. В этом случае создаваемая пленка обеспечивает увеличение контраста формируемого изображения. На поверхность образца напыляют хорошо поглощающий электроны материал (*Au*, *Mo*, *Cu*) под острым углом так, чтобы он конденсировался больше на одной стороне выступа, чем на другой (рис. IV.35).

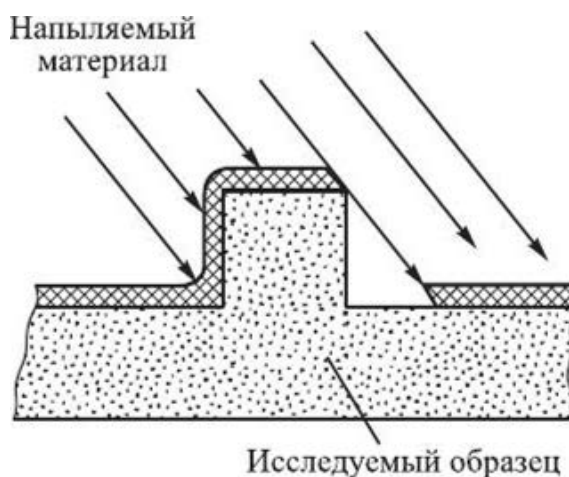


Рис. IV.35. Напыление оттеняющего слоя на пленочный объект

Смешанный метод иногда применяют при исследовании гетерофазных сплавов. В этом случае основную фазу (матрицу) изучают с помощью реплик (косвенный метод), а частицы, извлеченные из матрицы в реплику, исследуют прямым методом, в том числе с помощью микродифракции.

При этом методе реплику перед отделением разрезают на мелкие квадратики, а затем образец протравливают по режиму, обеспечивающему растворение материала матрицы и сохранение частиц других фаз. Травление проводят до полного отделения пленки-реплики от основы.

Особенно удобен смешанный метод при изучении мелкодисперсных фаз в матрице при их малой объемной доле. Отсутствие у реплики собственной структуры позволяет картины от частиц. При прямом методе такие картины выявить и отделить от картины для матрицы крайне сложно.

В связи с развитием нанотехнологии и особенно методов получения ультрадисперсных и наноразмерных порошков (фуллероидов, НТ и др.) данный метод обеспечил высокий интерес исследователей к ПЭМ. Подвергаемые исследованию ультрадисперсные и наноразмерные частицы высаживают на очень тонкую и практически прозрачную для электронных лучей мембрану, после чего помещают в колонну ПЭМ. Таким образом, можно наблюдать их структуру непосредственно — практически так же, как в обычном оптическом микроскопе, только с несравнимо более высоким разрешением.

IV.2.2.2. Растровая электронная микроскопия

Многие задачи, связанные с прямым исследованием микроструктуры поверхности, в том числе *фрактографии*, в настоящее время решаются методами растровой электронной микроскопии. *Растровая электронная микроскопия* осуществляется на растровых (или сканирующих) электронных микроскопах. В растровых электронных микроскопах (РЭМ) изображение создается за счет упругого отражения от изучаемой поверхности, или вторичной эмиссии электронов, излучаемых поверхностью, на которую падает непрерывно перемещающийся по этой поверхности поток первичных электронов. Изучается непосредственно структура поверхности объекта. Разрешающая способность несколько ниже, чем у просвечивающих микроскопов [21].

В этих приборах поверхность образца обследуется очень узким пучком электронов (зондом), который последовательно строчками пробегает по изучаемой поверхности. В каждой точке объекта под воздействием

электронного зонда возникает несколько видов излучения: упруго-отражённые рассеянные электроны, вторичные электроны, рентгеновские лучи и т. д. Эти излучения, преобразованные в электрические сигналы, используются для получения увеличенного изображения на экранах электроннолучевых трубок. Разрешение при этом может достигать $3\div 5$ нм.

Основное достоинство растровых электронных микроскопов состоит в том, что с их помощью можно очень быстро изучить большое число образцов, так как подготовка их весьма несложна, исследованию подвергаются практически обычные металлографические шлифы, сколы и изломы.

Растровые электронные микроскопы, снабженные детектором возбуждаемого в образце рентгеновского излучения, используются для локального рентгеноспектрального количественного анализа микроучастков образца. Для обозначения такого типа приборов обычно используют аббревиатуру РЭММА - растровый электронный микроскоп микроанализатор [20].

Характеристическое рентгеновское излучение, возбужденное в точке, на которую воздействует электронный зонд, попадает на кристалл-анализатор, разлагающий рентгеновское излучение в спектр. Из этого спектра можно выделить линии, характерные для заданного химического элемента. По интенсивности линий по отношению к эталонному образцу можно определить содержание данного элемента в исследуемом участке образца.

Этот сигнал, показывающий интенсивность линий характеристического спектра какого-либо элемента, можно направить в видеоблок и при сканировании электронного зонда по поверхности образца получить двумерную информацию (растровое изображение) о химическом составе приповерхностного слоя в рентгеновских лучах. При этом яркость отдельных участков изображения будет пропорциональна локальному содержанию выбранного компонента сплава.

Метод позволяет исследовать микроучастки размером до $3 \div 5$ мкм, чувствительность определения концентраций доходит до $0,1 \div 0,5\%$.

Внешний вид прибора приведен на *рис. IV.36*. В РЭМ, как и в ПЭМ, используется поток электронов, но в отличие от последнего РЭМ позволяет исследовать массивные образцы без их предварительной и крайне трудоемкой подготовки. Если в ПЭМ энергия электронов составляет сотни и более килоэлектронвольт, то в РЭМ от нескольких сотен электрон-вольт (низковольтный режим) до нескольких десятков килоэлектронвольт (традиционный режим).

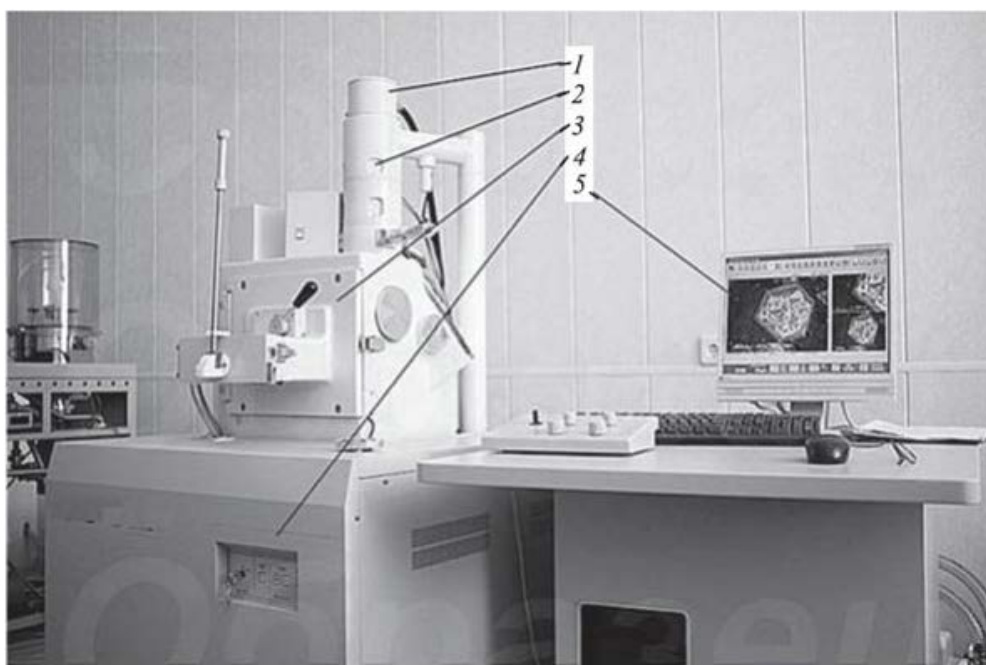


Рис. IV.36. Растровый электронный микроскоп:

1 — электронная пушка; 2 — зондоформирующая система; 3 — камера образцов; 4 — вакуумная система; 5 — монитор

Применение остросфокусированного (до $10A^\circ$ в диаметре) электронного зонда позволяет исследовать локальную область образца того же порядка.

Принцип работы РЭМ иллюстрируется схемой, приведенной на *рис. IV.37*. Электронная пушка 1 является источником электронов высокой яркости. С помощью зондоформирующей системы 3 уменьшенное до размеров нескольких нанометров изображение этого источника фокусируется на поверхности исследуемого образца.

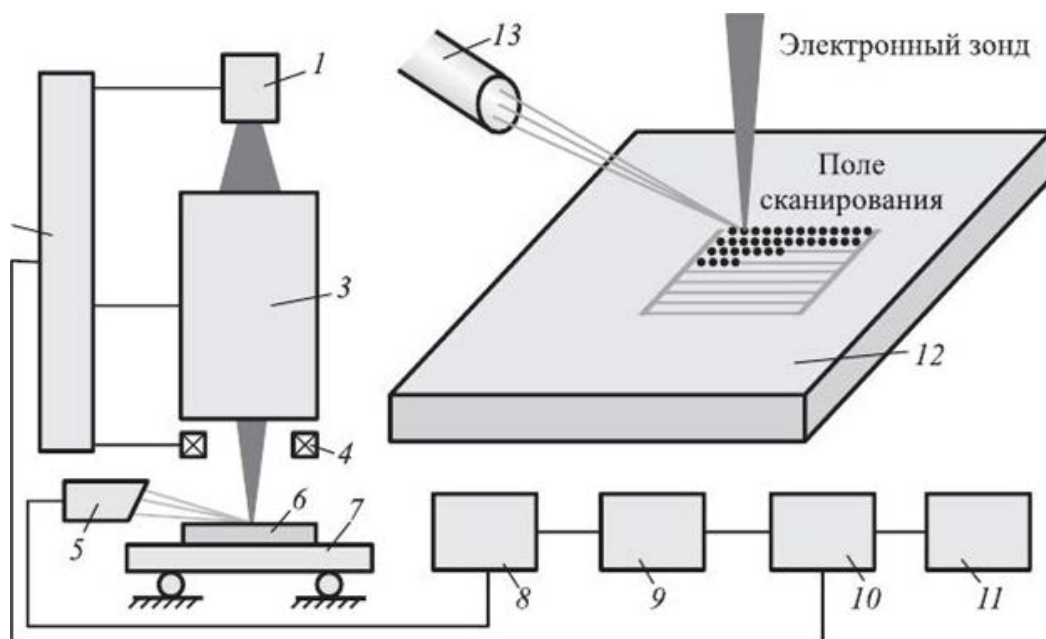


Рис. IV.37. Схема растрового электронного микроскопа:

- 1 — электронная пушка; 2 — блок управления электронным зондом;
- 3 — зондоформирующая система; 4 — растровая (отклоняющая) система;
- 5, 13 — преобразователь информационных сигналов (излучений);
- 6, 12 — исследуемый объект; 7 — рабочий стол; 8 — усилитель; 9 — аналого- цифровой преобразователь; 10 — персональный компьютер; 11 — монитор

Посредством растровой (отклоняющей или сканирующей) системы 4 электронный зонд перемещается по поверхности образца 6, последовательно облучая, точку за точкой, поле сканирования. Размер поля сканирования d связан с масштабом M формируемого изображения соотношением

$$M = D/d, \quad (IV.7)$$

где D — размер поля монитора, на который выводится изображение объекта.

Поскольку поле сканирования существенно меньше размеров исследуемого образца, последний размещается на рабочем столе 7. С его помощью требуемый участок поверхности совмещают с полем сканирования.

Текущую точку образца облучают электронным зондом и регистрируют соответствующим преобразователем 5 амплитуду информационного сигнала. Одновременно зарегистрированный сигнал усиливают (блок усиления 8) и через блок АЦП 9 подают на вход управляющего ПК 10, который задает яркость свечения пикселя на экране пропорционально амплитуде зарегистрированного сигнала. Далее переходят к облучению следующей точки.

Координаты облучаемой точки на поверхности образца и пикселя на экране монитора задают двумя числами; порядковым номером этого участка в строке и номером строки, на которой он расположен. Так как координаты облучаемой точки и соответствующего ей пикселя совпадают, на экране монитора складывается картина, соответствующая изменению амплитуды информационного сигнала от точки к точке. В этом состоит принципиальное отличие *РЭМ*-изображения от реального изображения поверхности, которое наблюдают в оптическом микроскопе.

Картина, возникающая на экране монитора в *РЭМ*, это абстрактное построение, результат отображения физических процессов, протекающих при взаимодействии электронного зонда с твердым телом. Его можно лишь интерпретировать как изображение, но для этого надо понимать физические механизмы, посредством которых оно формируется, и представлять, почему при перемещении зонда от точки к точке по поверхности образца регистрируемый сигнал претерпевает изменения.

Определим их как контраст $C = \Delta S / S_{cp}$, где ΔS — изменение сигнала между двумя любыми соседними точками на изображении; S_{cp} — усредненный сигнал. Если в двух точках сигнал различен по величине, то существует контраст изображения этих двух точек. Мерой контраста является величина $C = (S_1 - S_2) / S_{cp} = \Delta S / S_{cp}$.

Особенности формирования контраста в РЭМ

Растровый электронный микроскоп — не отдельный прибор, предназначенный для анализа одного параметра, а целая лаборатория, работающая на базе группы аналитических методов. Задавая условия облучения образца и применяя соответствующие преобразователи информационных сигналов, с помощью *РЭМ* можно реализовать следующие методы:

- растровая электронная микроскопия морфологического анализа;
- электронный микроанализ элементного состава;

- электронная оже-спектроскопия;
- электронная оже-спектроскопия потенциала появления;
- спектроскопия электронных потерь энергии;
- электронная спектроскопия для химического анализа;
- дифракция электронов низких энергий;
- дифракция электронов высоких энергий;
- анализ распределения электрических и магнитных полей, создаваемых объектом исследования.

В работе [20] детально описаны различные типы контрастов в зависимости от основных *физических механизмов* их возникновения.

IV.2.3. Дефектоскопия. Методы неразрушающего контроля металлов и сплавов

В современной практике широко применяется безобразцовый (внелабораторный) контроль качества не только соединяемых деталей (изделий), но и отдельных полуфабрикатов, конструкций и сооружений. В практике этот метод известен как неразрушающий (без разрушения деталей) контроль качества деталей, изделий и конструкций, который широко применяется в условиях производства и эксплуатации различных систем.

Этот метод используют для определения внешних и внутренних дефектов без разрушения деталей, к которым относятся узлы и изделия в крупногабаритных машинах, соединенных между собой различными видами сварки, паянием, болтовыми и резьбовыми соединениями, клепкой. Кроме того, безобразцовому контролю подвергают отливки, прокат, поковку и штамповку. Широкое применение нашел безобразцовый контроль различных трубопроводов (газо-, нефте-, водопроводов и трубопроводов) для других рабочих тел, как химически активных, так и нейтральных (пассивных).

С помощью этого метода определяется химический состав различных металлов и сплавов, из которых изготовлены изделия, несоответствие которого стандарту может приводить к дефектам в процессе эксплуатации.

По ГОСТ 15467—79* возможные дефекты в деталях, изделиях и конструкциях из конструкционных материалов подразделяются на следующие виды: явные, скрытые, критические, значительные и малозначительные.

Большинство дефектов можно обнаружить неразрушающим методом контроля. Неразрушающие методы контроля по сравнению с образцовым контролем качества изделий имеют большие преимущества и более эффективны. Эти методы позволяют экономить конструкционные материалы, быстро и качественно определять дефекты. По ГОСТ 18353-79 физические неразрушающие методы контроля качества изделий и конструкций подразделяются на следующие виды: акустический, вихревой, магнитный, оптический, проникающими веществами, радиоволновой, радиографический, тепловой и электрический. Кроме того, каждый из перечисленных видов контроля подразделяется с учетом взаимодействия изучаемого объекта с физическими полями, воздействующими на эти объекты, их параметрами, а также способами получения информации [22].

Неразрушающие методы контроля качества деталей и обнаружения в них дефектов проводятся по следующей технологической схеме: помещение исследуемого объекта в контролируемую среду; выявление с помощью приборов дефектов (состава материала, внешних параметров, погрешности форм и размеров и т. д.); преобразование полученных параметров в показатели, удобные для расшифровки и расшифровка полученных данных.

Методы неразрушающего контроля подразделяются на следующие виды:

- внешний контроль;
- контроль технологических режимов;
- физический (инструментальный) контроль.

Внешний контроль - это визуальный осмотр изделия (детали), сварного или иного соединения. Внешний контроль иногда проводят с помощью лупы или специального микроскопа. По внешнему осмотру определяют, прежде

всего, качество отливки, поковки, проката, сварки и т. д. В изделиях, полученных прокатом, ковкой и литьем, при внешнем осмотре выявляются следующие дефекты: расслоение, вырыв, свищи, флокены, инородные металлические и неметаллические включения, кованые трещины, отпечатки литейной формы, дефекты и искажения поверхности и формы прокатанных, кованных и литых изделий, чешуйчатость, рябизна, остатки окалины, заусенцы и другие дефекты, понижающие качество изделий в целом и ухудшающие их эксплуатационные свойства.

При внешнем осмотре отливок обнаруживаются следующие дефекты: узорчатая поверхность, пригар, шероховатость поверхности (следы материалов земляной литейной формы), вскипы, образованные кипением заливаемого в форму металла, недоливы, ужимы, усадочные раковины, трещины, газовые раковины, несоответствующие форме, размерам, и несоосность. Дефекты, обнаруженные внешним осмотром, могут быть как устранимыми, так и неустранимыми (брак).

В сварных соединениях, например в различных трубопроводах (нефтегазовая, химическая промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство и другие отрасли), внешний контроль является особенно важным. Невооруженным глазом или с помощью лупы проводят внешний осмотр сварного шва, выявляя типичные дефекты при сварке: перекос соединяемых деталей со смещением кромок, неравномерный (ослабленный или чрезмерно усиленный) шов, непровар, трещины, ноздреватость, кратеры и др. Часть этих дефектов связана с нарушением технологии сварки, часть — с низкой квалификацией сварщика, а часть — с качеством металла свариваемых деталей и их внутренними дефектами.

Контроль технологических режимов - это контроль соблюдения всех режимов производства полуфабрикатов (литья, проката, волочения,ковки, сварки, паяния, винтового и клепаного соединений и др.). В каждом производстве есть свои особенности технологических процессов, за которыми следят по приборам или проводят автоматический контроль или

внешнее наблюдение. В случае нарушения технологии для предотвращения дефектов (брака) дается определенная команда или делаются соответствующие выводы. Контроль технологических режимов обеспечивает получение качественных деталей, изделий и конструкций из различных материалов. При сварке важным параметром является выбор электрода и величины сварочного тока, а также проведение отжига сварного шва и околошовной зоны, при литье — температура заливки сплава, конструкции литейной формы и технологические операции, проводимые после охлаждения отливок (отжиг, нормализация, механическая обработка).

Физические (инструментальные) методы контроля основаны на применении переносных электронно-вычислительных (или шкальных) приборов. Например, переносным прибором МЭИ-Т7 можно определить механические свойства сварного шва, крупногабаритного проката, отливок, емкостей без вырезки образцов, т. е. без разрушения.

Физические методы контроля позволяют определить как наружные, так и внутренние дефекты деталей, узлов, изделий и сооружений.

Каждый из физических методов имеет свои особенности и разновидности.

Акустический метод контроля основан на звуковых или ультразвуковых колебаниях контролируемых участков. Этот метод также имеет несколько разновидностей.

Для контроля качества сварных соединений применяют также *метод «красок»*, с помощью которого выявляют дефекты, не обнаруженные при внешнем осмотре.

Контроль паяных и сварных соединений на плотность (герметичность) проверяют методом смачивания керосином или методом статического гидравлического или пневматического (воздухом) давления (опрессовка). При опрессовке давление создается в $1,5 \div 2$ раза выше рабочего давления трубопроводов. Применяется также метод течеискания (истечения) рабочих тел в трубопроводах.

Наиболее широкое применение нашел метод ультразвуковой дефектоскопии, которым определяются внутренние дефекты сварных соединений как в основном металле, так и в металле шва, а также толщина коррозионного повреждения в трубопроводах различного назначения и ответственных металлоконструкциях. Это обычно малогабаритные приборы, работающие как от сети переменного тока, так и от аккумуляторной батареи (мод. 26M6, 26DLPLVS, 25I27DL и др.).

Цифровые толщиномеры, ультразвуковые дефектоскопы могут быть как многорежимные с 40 и более блоками памяти, с дисплеем для проверки формы волны и внутренним коллектором данных на несколько тысяч контрольных точек, так и простые двухступенчатые низко- и высокотемпературные (до 500°C). Это различные модели приборов, выпускаемые фирмой *Panametrics* (США). В ряде случаев находят применение видеокамеры с автоматической подачей (движением), которые фиксируют и передают информацию о внутренних повреждениях (трещины, сколы, коррозия, инородные тела и др.) на видеомэгнитофон.

С помощью корреляционного акустического течеискателя мод. LC-2100 методом корреляции акустических колебаний, производимых утечкой рабочей жидкости (нефть, нефтепродукты, вода и другие жидкости), наиболее эффективно определяется местоположение дефектов в трубопроводе.

Портативный течеискатель, имеющий малые габаритные размеры, позволяет в полевых условиях определять дефекты труб, производить распечатку информации на портативном принтере с сохранением данных измерений, а также их обработку на компьютере.

В практику дефектоскопии вошли передвижные аварийно-диагностические лаборатории (на колесах) для различных трубопроводов. Это техника нового поколения, применяемая для диагностирования и дефектоскопии трубопроводов различного назначения. Передвижные лаборатории дают возможность стабильного обеспечения нефтепродуктами,

водой, теплом, а также в кратчайшие сроки позволяют устранять в сетях аварии. Оборудование немецкой фирмы Seba dunatroniks и других фирм монтируют на шасси отечественных автомобилей ЗИЛ-33102, УАЗ-3303, ГАЗ-6611 и др. Благодаря систематической дефектоскопии и диагностике состояния около 150 000 км трубопроводов в Российской Федерации работают в безаварийном режиме, стабильно обеспечивая промышленные предприятия и коммунальное хозяйство газом, теплом, водой.

Физические методы контроля с помощью ультразвуковых дефектоскопов, измерительных технологий, ультразвуковых толщиномеров и течеискателей, смонтированных на передвижных лабораториях, дают большой экономический эффект в различных отраслях экономики.

Радиационные методы контроля имеет три разновидности:

- радиографический — позволяет выявлять и документально фиксировать дефекты;
- радиоскопический — позволяет выявлять дефекты и наблюдать за ними на экране монитора (прибора);
- радиометрический - основан на проникновении γ -излучений в исследуемый узел. В случае внутренних дефектов приборы фиксируют и дают показания на соответствующей шкале прибора.

Радиографический анализ начал развиваться с появлением искусственных радиоактивных изотопов. Чаще всего этот метод используется как автордиографический. Для изучения распределения какого-либо компонента сплава или примеси в структуре в металл вводят радиоактивный изотоп этого химического элемента. Затем приготавливают макро- или микрошлиф, на который накладывают пластинку или бумагу со специальной эмульсией, чувствительной к излучению радиоактивного изотопа. В местах скопления этого изотопа эмульсия засвечивается и после фотообработки удается очень наглядно качественно, а иногда и

количественно изучить распределение данного элемента в структуре сплава как в макро, так и в микромасштабах.

ГЛАВА V

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Эксплуатация большинства изделий, агрегатов, машин и оборудования теплоэнергетического комплекса происходит в условиях воздействия высоких температур, печных газов, эрозийного и кавитационного износа и т. п. По этой причине применяемые материалы должны обладать устойчивостью к воздействию температуры и рабочей среды.

§ V.1. Конструкционные стали и сплавы

V.1.1. Классификация сталей

Стали классифицируют по следующим признакам: химическому составу, качеству, структуре, применению [1,2].

По *химическому составу* различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. При этом учитываются способ выплавки и содержание серы и фосфора.

Определение классов по химическому составу, по эквивалентной массовой доле легирующих элементов, при условии, что её химический состав удовлетворяет требованиям соответствующего стандарта [12].

Нелегированные и легированные стали

К нелегированным сталям относятся такие стали, у которых массовая доля любого химического элемента менее указанной в *таблице V.1*.

Для маркировки стали в России пользуются определенным сочетанием цифр и букв, показывающих примерный химический состав стали.

Используют следующие обозначения химических элементов: Г — марганец, М — молибден, Д — медь, Р — бор, С — кремний, В — вольфрам, Ю — алюминий, П — фосфор, Н — никель, Ф — ванадий, Б — ниобий, А — азот, Х — хром, Т — титан, К — кобальт, Ц — цирконий.

Таблица V.1

Предельные значения массовой доли для разграничения между нелегированными и легированными сталями по анализу ковшевой пробы (маркировочному анализу)

Химический элемент		Предельное значение массовой доли, %
Обозначение	Наименование	
Al	Алюминий	0,30
B	Бор	0,0008
Bi	Висмут	0,10
Co	Кобальт	0,30
Cr	Хром	0,30
Cu	Медь	0,40
La	Лантаноиды (каждый)	0,10
Mn	Марганец	1,65
Mo	Молибден	0,08
Nb	Ниобий	0,06
Ni	Никель	0,30
Pb	Свинец	0,40
Se	Селен	0,10
Si	Кремний	0,50
Te	Теллур	0,10
Ti	Титан	0,05
V	Ванадий	0,10
W	Вольфрам	0,30
Zr	Цирконий	0,05
	Другие элементы, кроме углерода, фосфора, серы, азота (каждый)	0,10
<p>Когда для марганца установлен только верхний предел, этот показатель должен быть 1,80%, и правило 70% не действует (3.1.2).</p>		

Первые цифры в марке стали указывают содержание углерода в сотых долях процента. Если в начале маркировки перед буквами стоит одна цифра, то она выражает содержание углерода в десятых долях процента; при содержании углерода свыше 1% цифру перед буквами не ставят.

Далее в маркировке следуют буквы, показывающие наличие соответствующих легирующих элементов в составе стали. Цифры за буквами показывают среднее (округленное до 1) процентное содержание легирующего элемента. При этом если содержание элемента до 1,5%, цифра не ставится.

В отдельных случаях может быть указано более точно содержание легирующего элемента. Например, сталь 32X06Л — содержит в среднем 0,32% С и 0,6% Cr. Последняя буква «Л» указывает, что сталь литейная.

Для обозначения высококачественной легированной стали в конце маркировки добавляют букву «А». Высококачественная сталь содержит меньше серы и фосфора, чем качественная.

Некоторые стали специального назначения выделены в отдельные группы и имеют особую маркировку. Каждой группе присваивается своя буква и ставится впереди:

Ж — хромистая нержавеющая сталь;

Я — хромоникелевая нержавеющая сталь;

Р — быстрорежущая сталь;

Ш — шарикоподшипниковая сталь;

Е — электротехническая сталь.

Структура стали - менее устойчивый классификационный признак, так как зависит от скорости охлаждения (толщины стенки отливок), степени легирования, режима термообработки и других изменяющихся факторов, но структура готового изделия позволяет объективно оценивать его качество.

По *структуре* различают стали в отожженном и нормализованном состоянии: в отожженном состоянии - доэвтектоидный, заэвтектоидный, *ледебуритный* (карбидный), *ферритный* и *аустенитный* классы; в нормализованном состоянии - *перлитный*, *мартенситный* и *аустенитный* (см. приложение) классы, получение которых обусловлено влиянием легирующих элементов на изотермический распад аустенита. К перлитному классу относят углеродистые и легированные стали с низким содержанием

легирующих элементов, к мартенситным - с более высоким и к аустенитному - с высоким содержанием легирующих элементов.

Классифицируют стали по структуре в состояниях после отжига и нормализации.

В *отожженном состоянии* стали подразделяют:

- на *доэвтектоидные*, имеющие в структуре избыточный феррит;
- *эвтектоидные*, структура которых состоит из перлита;
- *заэвтектоидные*, в структуре которых имеются вторичные карбиды, выделяющиеся из аустенита;
- *ледебуритные*, в структуре которых содержатся первичные (эвтектические) карбиды;
- *аустенитные*,
- *ферритные*.

На формирование структуры стали в наибольшей степени влияет *углерод*. После *нормализации* структура сталей без термической обработки состоит из смеси феррита и цементита (структура такой стали либо перлит + феррит, либо перлит + цементит). Количество цементита в стали прямо пропорционально содержанию углерода. Твердые частицы цементита повышают сопротивление деформации, уменьшая пластичность и вязкость. Таким образом, с увеличением в стали содержания углерода возрастают твердость, предел прочности и уменьшаются вязкость, относительное удлинение и сужение.

Для *заэвтектоидных* сталей на их механические свойства сильное влияние оказывает вторичный цементит, который образует хрупкую сетку вокруг зерен перлита. Эта сетка способствует преждевременному разрушению стального изделия под нагрузкой. Поэтому *заэвтектоидные* стали применяют после специального отжига, в результате которого получают в структуре зернистый перлит.

Уменьшение содержания *углерода* ниже 0,3% и увеличение сверх 0,4% приводит к ухудшению обрабатываемости резанием. Дальнейшее увеличение

содержания *углерода* снижает технологическую пластичность стали при обработке давлением и ухудшает ее свариваемость - способность материалов образовывать неразъемные соединения с заданными свойствами.

Кремний слабо влияет на структуру и механические свойства углеродистой стали, но как раскислитель он способствует улучшению литейных свойств. *Кремний* сильно повышает предел текучести стали, что снижает ее способность к вытяжке. Поэтому в сталях, предназначенных для холодной штамповки, содержание *кремния* должно быть наименьшим.

Марганец является хорошим десульфуратором и раскислителем (уменьшает вредное влияние серы и кислорода); способствует повышению механических свойств стали, не снижая пластичности, и резко уменьшает хрупкость при высоких температурах (красноломкость). В отечественной практике содержание марганца выдерживают в пределах $0,35 \div 0,65\%$ в низкоуглеродистых сталях и $0,5 \div 0,8\%$ в средне- и высокоуглеродистых. Многие зарубежные фирмы предпочитают иметь в углеродистых сталях $0,9 \div 1,1\%$ марганца.

Сера является вредной примесью в стали, ее содержание не должно превышать $0,06\%$. С железом сера образует химическое соединение - сульфид железа (легкоплавкий эвтектический сплав), располагающийся обычно по границам зерен металлической матрицы. При нагревании стали до $1000 \div 1300^\circ\text{C}$ эвтектика расплавляется и нарушается связь между зернами металла, т.е. происходит охрупчивание.

При наличии в стали марганца исключается образование легкоплавкой эвтектики и явление красноломкости.

Сульфиды, как и другие неметаллические включения, сильно снижают однородность строения и механические свойства стали, в особенности пластичность, ударную вязкость и предел выносливости, а также ухудшают свариваемость и коррозионную стойкость.

Фосфор является вредной примесью в стали, и содержание его не должно превышать $0,08\%$. Растворяясь в феррите, фосфор сильно искажает и

уплотняет его кристаллическую решетку. При этом увеличиваются пределы прочности и текучести сплава, но уменьшаются его пластичность и вязкость. Фосфор значительно повышает порог хладноломкости стали.

Газы (азот, водород, кислород) частично растворены в стали и присутствуют в виде хрупких неметаллических включений - оксидов и нитридов. Концентрируясь по границам зерен, они повышают порог хладноломкости, понижают предел выносливости и сопротивление хрупкому разрушению. Например, хрупкие оксиды при горячей обработке стали давлением не деформируются, а крошатся и разрыхляют металл.

Кремний, марганец, сера, фосфор, а также газы: *кислород, азот, водород* - являются постоянными примесями в стали. Кроме них в стали могут быть *случайные примеси*, попадающие в сталь из вторичного сырья или руд отдельных месторождений. Из стального лома (скрапа) в сталь могут попасть *хром, никель, олово* и ряд других элементов. Отдельные примеси находятся в стали в небольших количествах и не оказывают существенного влияния.

Конструкционные стали, делятся на три группы по своему назначению. Подразделяются на стали:

- - обыкновенного качества;
- - улучшаемые;
- - цементируемые;
- - автоматные;
- - высокопрочные;
- - рессорно-пружинные.

Инструментальные, подразделяют на подгруппы по изготовлению:

- режущего инструмента; измерительного инструмента; штам- пово- прессовой оснастки;

Стали специального назначения с особыми физическими и механическими свойствами:

- - нержавеющие (коррозионно-стойкие);

- - жаростойкие;
- - жаропрочные;
- - износостойкие и др.

Под *качеством* понимается совокупность свойств стали, определяемых металлургическим процессом ее производства. Однородность химического состава, строение и свойства стали зависят от содержания вредных примесей и газов.

По *качеству* стали классифицируются на:

- *обыкновенного качества*, содержат до 0,06% S и 0,07% P;
- *качественные*, содержащие до 0,035% S и 0,035% P;
- *высококачественные* — не более 0,025% S и 0,025% P;
- *особо высококачественные* — не более 0,015% S и 0,025% P.

По *применению* стали подразделяют на следующие группы:

- конструкционные стали - для деталей машин и конструкций;
- инструментальные стали — для различного инструмента;
- стали и сплавы с особыми свойствами - например, жаропрочные, коррозионно-стойкие, магнитные и др.

V.1.2. Свойства сталей, обеспечивающие устойчивость к воздействию температуры и рабочей среды

Конструкционные материалы, применяемые в теплоэнергетике и теплотехнике, должны обладать жаропрочностью, а также *жаро-* и *коррозионностойкостью*. Результаты испытаний на кратковременный разрыв при высоких температурах могут служить для ориентировочной оценки применяемых материалов, так как с увеличением времени выдержки при нагрузке под действием высоких температур характеристики прочности (предел прочности $\sigma_{\text{п}}$ и предел текучести $\sigma_{\text{т}}$) снижаются. При кратковременных испытаниях на разрыв в условиях высоких температур фактор времени на прочность влияния не оказывает [3].

Жаропрочность отражает свойство стали сохранять прочность, пластичность и стабильность структуры при высоких температурах в условиях ползучести металла в течение расчетного срока службы в сочетании с высокой коррозионной стойкостью (при температурах эксплуатации не выше 585°C и умеренном коррозионном воздействии среды).

Жаропрочность характеризуют *пределом длительной прочности* и *пределом ползучести*, показывающими время до начала разрушения при заданных напряжениях, температуре и рабочей атмосфере. Жаропрочность зависит от химического состава и технологии изготовления сплава.

Ползучесть - свойство металлов медленно и непрерывно пластически деформироваться («ползти») при статическом нагружении в условиях длительной работы при высоких температурах даже в тех случаях, когда действующие напряжения имеют значения значительно ниже предела текучести металла при данных температурах.

Сложные и разнообразные явления происходят в металле, длительно работающем в условиях постоянной нагрузки и высоких температур. Действующие на металл напряжения вызывают деформацию и связанное с ней упрочнение - повышение прочности и твердости, снижение пластичности. Одновременно происходят структурные изменения - сдвиги в кристаллах, двойникование, вытягивание зерна металла в направлении действующих сил. Действие высоких температур вызывает разупрочнение - снижение прочности и твердости при повышении пластичности. Высокая температура способствует протеканию процесса рекристаллизации холоднодеформированного металла. При этом вытянутые зерна вновь восстанавливают первоначальную равноосную форму. Таким образом, упрочнение и изменение структуры, происшедшие в результате холодной деформации при повышении температуры, оказываются неустойчивыми.

Одновременно происходящие в металле противоположные процессы упрочнения при деформации его под действием напряжения и разупрочнения

под действием высоких температур и определяют в основном развитие явления ползучести металла. Чем ниже температура рекристаллизации, тем при более низких температурах начинается ползучесть. Основными факторами, обуславливающими ползучесть различных металлов, являются величины действующего напряжения, температуры и времени. В цветных металлах и сплавах ползучесть происходит даже при комнатной температуре, в углеродистых сталях она наблюдается при температурах 350-400 °С, а в легированных - при более высоких температурах в зависимости от химического состава и технологии изготовления стали или сплава, термической обработки, степени загрязненности, величины зерна структурных составляющих и др.

Типичная кривая ползучести металла, доведенного до разрушения при постоянной температуре (t) и постоянном напряжении (σ), представлена на *рис. V.1* и включает три стадии:

- стадия I;

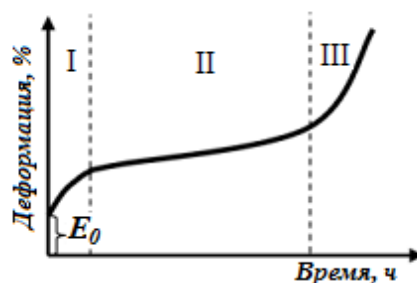


Рис. V.1. Кривая ползучести

- стадия II, период установившейся ползучести, при котором деформация протекает с большой, но убывающей скоростью, характеризующийся постоянной и минимальной для данных напряжений и температуры скоростью ползучести. Этому предшествует мгновенная деформация E_0 , полученная в момент приложения нагрузки (начальная или внезапная деформация);

- стадия III, период нарастающей скорости ползучести, с образованием шейки. Завершается кривая ползучести разрушением материала [4,5,6,7].

Допускаемые напряжения металла детали, работающей в условиях ползучести, должны находиться в пределах периода установившейся ползучести. С повышением напряжения при постоянной температуре степень первоначального растяжения и последующее нарастание пластических деформаций увеличиваются (рис. V.2,а).

Следовательно, с ростом напряжения укорачивается 2-й период установившейся ползучести и приближается действие 3-го периода нарастающей ползучести, предшествующего разрушению. Повышение температуры (рис. V.5,б) при одинаковой величине растягивающих напряжений действует в том же направлении.

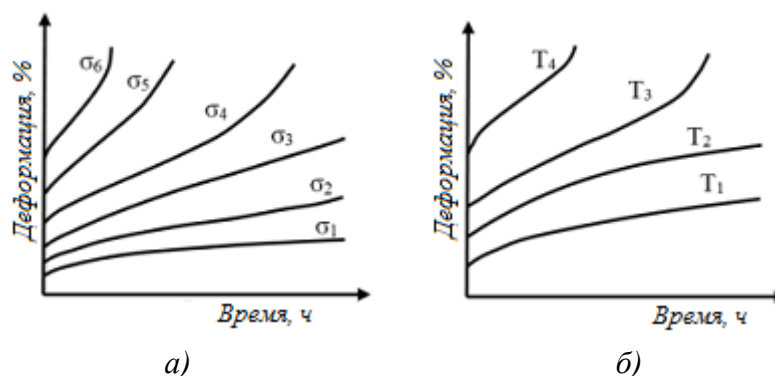


Рис. V.2. Кривые ползучести одного и того же металла при различных условиях:
а - температура постоянная, напряжения увеличиваются; б - напряжения постоянные, температура увеличивается

Как следует из кривых, можно подобрать такую величину напряжений, при которой для данной температуры 3-го периода ползучести за время службы детали не будет. Однако соблюдение только этого условия, устраняющего возможность разрушения металла за время его службы, в ряде случаев еще не обеспечивает надежной работы детали, так как деформация ползучести металла (кривая 2-го периода) непрерывно возрастает. Существенную роль в развитии процесса ползучести рассматриваемого металла играют изменение его структуры, старение и ряд других факторов протекающих под воздействием температуры.

Деформация ползучести - величина пластической деформации (%), полученная деталью за определенный промежуток времени. Деформация

ползучести может привести к недопустимому изменению величины зазоров, поэтому в скорость ползучести вводятся ограничения.

Скорость ползучести - величина пластической деформации (линейной), вызываемая ползучестью, отнесенная к единице длины в единицу времени. Скорость ползучести определяется обычно во 2-й установившейся стадии ползучести и определяется выражением (V.1):

$$v_n = \frac{\varepsilon}{\tau}, \quad (V.1)$$

где v_n - скорость ползучести, %/ч; ε – деформация, %; τ - время, ч.

Допустимая скорость ползучести выбирается таким образом, чтобы суммарная деформация ползучести детали за весь период не превысила определенной величины, обусловленной конструктивными соображениями. Если срок службы (τ) составляет 100 000 ч, а допустимая общая деформация (δ) ее не должна превышать 1 % длины, то скорость ползучести для этой детали будет равна:

$$v_n = \frac{1}{100000} = 1 \cdot 10^{-5}, \text{ (} \% / \text{ч)}. \quad (V.2)$$

Исследование металла, доведенного до разрушения при температуре 20°C, свидетельствует о том, что зерна этого металла значительно деформированы в направлении действующего усилия, и поэтому его разрушение происходит по зернам. Такому растяжению предшествует значительная пластическая деформация, в результате чего образец разрывается с высокими значениями относительного удлинения и сжатия.

Разрушение образца после длительного воздействия высоких температур имеет иной характер. В этих условиях деформация зерен значительно уменьшается, и происходит относительный сдвиг зерен, при котором между зернами образуются микротрещины и сплошность металла нарушается. В этом случае предшествующая разрушению пластическая деформация оказывается весьма незначительной.

При нормальной температуре (20°C) прочность зерен металла меньше, чем прочность сцепления зерен между собой. Происходящее разрушение

металла по зернам является транскристаллитным. С повышением температуры прочность зерен уменьшается, но одновременно с этим возрастает скорость уменьшения прочности по границам зерен - прочность сцепления соседних зерен между собой.

Температура, при которой прочность зерен равна прочности сцепления по границам зерен, называется температурой, *равной прочности*. Характер разрушений (транскристаллитный, интеркристаллитный, смешанный) при высоких температурах зависит не только от температуры, но и от ряда других факторов: от напряжения; времени, в течение которого напряжения действуют на металл; скорости ползучести. В настоящее время температура равной прочности не рассматривается как некоторая определенная величина, постоянная для данного металла. После длительной работы в условиях ползучести разрушение металла происходит обычно по границам зерен и носит интеркристаллитный характер.

Деформация при разрушении углеродистых сталей после длительной нагрузки в условиях высоких температур достигает $4 \div 6\%$; малоуглеродистых молибденовых и хромомолибденовых $-2 \div 4\%$. Исходя из этого, скорость ползучести должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы деформация за весь период эксплуатации была меньше деформации, наблюдаемой при разрушении металла в условиях ползучести.

Критерием оценки сопротивления металла ползучести служит условный (технический) *предел ползучести* σ_n , т. е. такое напряжение, при котором скорость ползучести на установившемся участке кривой ползучести (II - стадия) или суммарная деформация ползучести за определенный промежуток времени достигала некоторой условной (допустимой) величины.

Предел ползучести, как напряжение, вызывающее обусловленную скорость ползучести по ГОСТ 3248-81, обозначается буквой σ_n с двумя числовыми индексами. Нижний индекс означает заданную скорость ползучести ($\%/ч$), верхний - температуру испытания ($^{\circ}C$).

Например, $\sigma_{100000}^{550} = 100 \text{ МПа}$ означает, что под действием напряжения 100 МПа за 100000 ч при 550°C в материале появится пластическая деформация равная 1% .

В турбостроении предел ползучести определяется по деформации, полученной за время установившейся ползучести с постоянной скоростью.

Предельные напряжения, вызывающие заданную деформацию, определяются путем экстраполяции результатов испытаний, длительность которых обычно составляет $1000 \div 2500 \text{ ч}$.

Исследования большого числа труб поверхностей нагрева котлов и прямых участков трубопроводов, разрушившихся или получивших повреждения из-за ползучести при высоких температурах, показывает, что первые трещины всегда зарождаются в поверхностных слоях. К такому же выводу приводят исследования изломов и шлифов цилиндрических образцов, испытанных на длительную прочность при растяжении, а также трубчатых образцов, разрушенных при испытании внутренним давлением на длительную прочность в лабораторных условиях. В поверхностных слоях пластическая деформация протекает в других условиях, чем во внутренних объемах - каждый кристаллит может относительно свободно перемещаться, так как стеснен лишь с трех сторон другими кристаллитами. Если это явление не играет решающей роли при пластической деформации в области низких температур, когда связь между кристаллитами по их границам очень сильна, то при высоких температурах, когда наблюдается интеркристаллитное скольжение, более легкое перемещение поверхностных кристаллитов в процессе ползучести может служить одной из основных причин, приводящих к образованию трещин в поверхностных слоях.

При относительно низких температурах и высоких напряжениях накопление деформации при ползучести происходит путем сдвигов и, в конечном счете, путем перемещения дислокаций.

При высоких температурах и малых приложенных напряжениях основным механизмом накопления пластической деформации служит

диффузионная подвижность атомов. И в этом, и в другом случае поверхностные слои должны служить местом образования первых трещин.

Хорошо известно, что дислокации, имеющие выход на свободную поверхность кристалла, обладают повышенной подвижностью; т. е. для приведения их в движение требуется меньшее напряжение, чем для приведения в движение дислокации в середине кристалла. Выход серии дислокаций по одной плоскости скольжения на поверхность образца может инициировать образование трещин на свободной поверхности. Диффузионная подвижность атомов по наружной поверхности также значительно выше, чем по границам зерен. Поэтому первые колонии вакансий должны образовываться на поверхности образца или детали.

Подтверждением того, что поверхностные слои являются областью накопления дефектов и что именно отсюда начинается разрушение, может служить известный факт повышения срока службы образцов при испытании на длительную прочность при периодическом травлении их поверхности.

С повышением температуры сопротивление ползучести сталей уменьшается. Предельные температуры использования некоторых материалов приведены в *табл. V.2*.

Таблица V.2

*Предельные температуры применения некоторых металлов
в условиях длительной ползучести*

<i>Материал</i>	<i>Предельная температура, °C</i>
<i>Углеродистые стали</i>	<i>450</i>
<i>Перлитные стали (молибденовые, хроммолибденовые)</i>	<i>480-510</i>
<i>Жаропрочные перлитные стали</i>	<i>535-580</i>
<i>Стали мартенситного класса, с содержанием Cr не менее 12 %</i>	<i>600</i>
<i>Аустенитные стали</i>	<i>600-750</i>
<i>Материал</i>	<i>Предельная температура, °C</i>
<i>Углеродистые стали</i>	<i>450</i>
<i>Перлитные стали (молибденовые, хроммолибденовые)</i>	<i>480-510</i>
<i>Жаропрочные перлитные стали</i>	<i>535-580</i>

Стали мартенситного класса, с содержанием Cr не менее 12 %	600
Аустенитные стали	600-750

Кратковременный перегрев металла способствует значительному увеличению деформации (см. *рис. V.2,б*), что может повлечь разрушение материала в более короткий период.

На *рис. V.3* показано раскрытие трубы, характерное для перегрева и вызванное увеличением ползучести.



Рис. V.3. Раскрытие экранной трубы, вследствие перегрева металла

Предел длительной прочности. Способность металла сопротивляться разрушению при воздействии высокой температуры и напряжений характеризуется *пределом длительной прочности* ($\sigma_{дл}$) - напряжением, приводящим металл при данной температуре через определенный промежуток времени к разрушению.

Предел ползучести и предел длительной прочности являются совершенно различными прочностными характеристиками металлов, дополняющими одна другую. Предел ползучести характеризует сопротивление материала пластической деформации, а предел длительной прочности является характеристикой сопротивления материала, подверженного разрушению, поэтому зависимости между этими характеристиками не существует.

В обозначении предела длительной прочности указывают температуру и время до разрушения. Например, $\sigma_{100000}^{500} = 130 \text{ МПа}$ означает, что при

500°C материал выдерживает действие напряжения, равного 130 МПа, в течение 100000 ч.

Предел длительной прочности, как и предел ползучести, является базовой характеристикой расчетов на прочность при работе детали в условиях ползучести.

Допускаемые напряжения, выбираемые по скорости ползучести, должны быть меньше предела длительной прочности.

Основными способами повышения длительной прочности и сопротивляемости ползучести сталей являются рациональное легирование и применение оптимальных режимов термической обработки.

Пределы длительной прочности и ползучести зависят в значительной степени от микроструктуры стали.

Для повышения жаропрочности стали необходимо обеспечить торможение дислокаций и диффузии вакансий как по границам, так и в объеме зерна. Дислокации хорошо затормаживаются мелкодисперсными карбидами и интерметаллидами [8,9,10].

Легирование твердого раствора элементами, повышающими жаропрочность, приводит к усилению межатомных связей, уменьшает диффузионную подвижность вакансий и тем самым замедляет диффузионную ползучесть. Сильные карбидообразователи - хром, молибден, титан, ниобий - связывают углерод в прочные карбиды, затрудняют его диффузию и способствуют получению стабильной структуры. Из-за искажений кристаллической решетки в районе дислокаций в их окрестности сильно повышается растворимость. Вокруг дислокаций особенно легко концентрируются атомы элементов, образующих растворы внедрения, - углерода, азота, бора и др. Поэтому дислокации часто оказываются местами зарождения частиц второй фазы.

Мелкое зерно, особенно в аустенитной стали (мельче восьмого балла по стандартной шкале), способствует ускорению ползучести и снижает предел длительной прочности. Выше отмечалось, что при высоких

температурах пластическая деформация протекает интенсивно по границам зерен. Вклад границ зерен в общую ползучесть особенно велик при большой протяженности границ, что характерно для мелкозернистой стали. В результате мелкозернистая сталь отличается пониженным пределом ползучести и низкой длительной прочностью.

Усталость металлов

Усталость металлов - явление разрушения в результате многократных повторных нагружений [11].

Повреждение деталей котлов и трубопроводов в ряде случаев вызваны малоцикловой термической усталостью металла. Нагрузки, изменяющиеся во времени, возникают при пусках и остановках, а также при изменении режимов. Эти нагрузки связаны с изменением температуры и давления рабочей среды и играют большую роль в обеспечении надежности.

Металл состоит из отдельных беспорядочно ориентированных кристаллов неправильной формы - зерен. При повторных нагружениях в отдельных, наименее благоприятно ориентированных зернах возникает сдвиг - пластическая деформация. При многократных повторных нагружениях в противоположные стороны неблагоприятно ориентированных зерен по линиям скольжения постепенно развивается трещина - она проходит через все зерно, пересекает границу и распространяется на соседние зерна. Постепенно трещина разрастается. Сечение неослабленного металла все уменьшается, и при каком-то очередном нагружении металл внезапно разрушается от усталости.

Усталостное разрушение может вызывать напряжение меньше предела текучести и даже меньше предела упругости. Разрушение усталостного характера можно наблюдать на валах или лопатках дымососов и вентиляторов. Обычно металлы испытывают на усталость при симметричном цикле нагружения. Результаты испытания представляют в виде кривой усталости (*рис. V.4*).

По вертикальной оси на кривой усталости откладывают напряжение, а по горизонтальной оси - число циклов, вызвавших разрушение при этом напряжении. Первый образец испытывают при напряжении, составляющем $0,6 \div 0,7$ предела прочности. Последующие образцы испытывают при уменьшающихся напряжениях. Общее количество образцов должно быть не менее $10 \div 12$ шт. Максимальное напряжение, которое не привело к разрушению за заданное число циклов, называют условным пределом усталости. Максимальное напряжение, которое не приводит к разрушению за какое угодно большое число циклов, называется *физическим пределом усталости* и существует только у углеродистых, низко- и среднелегированных сталей при комнатной температуре. Цветные металлы и сплавы, а также стали при высоких температурах не имеют физического предела усталости. Поэтому для них приходится определять условный *предел усталости* обычно на базе $50 \div 100$ млн циклов и даже более.

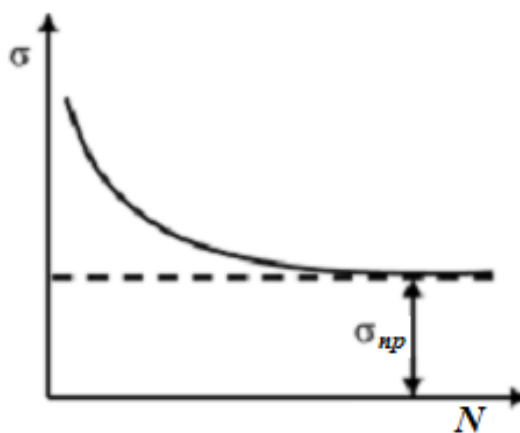


Рис. V.4. Кривая усталости стали при комнатной температуре (схема) в линейных координатах

Малоцикловая усталость - явление разрушения при напряжениях выше физического предела усталости. Заданное число циклов для сталей при комнатной температуре равно обычно $5 \div 10$ млн. Если сталь под действием какого-то циклически изменяющегося напряжения не разрушилась при комнатной температуре в результате $5 \div 10$ млн циклов, то она не разрушится и при большем числе циклов.

Термическая усталость - разрушение от периодически возникающих и изменяющихся во времени термических напряжений, обусловленных расширением металла деталей при нагревании или сжатием при охлаждении. При быстром нагреве или охлаждении поверхности толстостенной детали по ее сечению возникает градиент температур. Разность температур в детали приводит к образованию термических напряжений. Так, в нагреваемом стержне наружные слои нагреваются сильнее. Если бы они не были связаны с внутренними слоями, то их длина увеличилась бы в соответствии с законом линейного расширения, однако внутренние, более холодные слои препятствуют этому расширению. В результате этого наружные слои оказываются сжатыми, а внутренние - растянутыми. При охлаждении характер напряжений изменяется в обратном порядке.

В деталях котлов и трубопроводов при резком наборе или сбросе нагрузки, а также при аварийных остановках могут возникать напряжения, превышающие предел текучести. Повторное многократное приложение таких напряжений приведет к разрушению от малоциклового усталости. Для этих напряжений обычно свойствен случайный характер изменения во времени при асимметричном цикле.

Величина термических напряжений и вызываемая ими деформация зависят от степени стеснения деформации. При свободном расширении равномерно нагреваемого стержня степень стеснения деформации отсутствует, а температурные напряжения равны нулю. Углеродистые стали менее стойки против тепловой усталости, чем низколегированные стали перлитного класса.

Термической усталости подвержены внутренние поверхности паропроводов в местах впрыска воды для регулирования температуры перегрева пара, паропроводы в местах заброса конденсата из дренажных линий; чередующиеся нагревы и охлаждения могут происходить при пульсации границы раздела между паром и водой в переходной зоне прямоточного котла до критических параметров при периодической подаче

относительно холодной питательной воды в барабан котла, при движении пароводяной смеси по горизонтальным или слабонаклонным трубам, обогреваемым топочными газами.

В этом случае количество циклов за срок службы трубы поверхности нагрева или трубопровода существенно превышает 10^4 . Трещины, возникающие в трубе из-за термической усталости, могут быть продольными (рис. V.5) и кольцевыми.

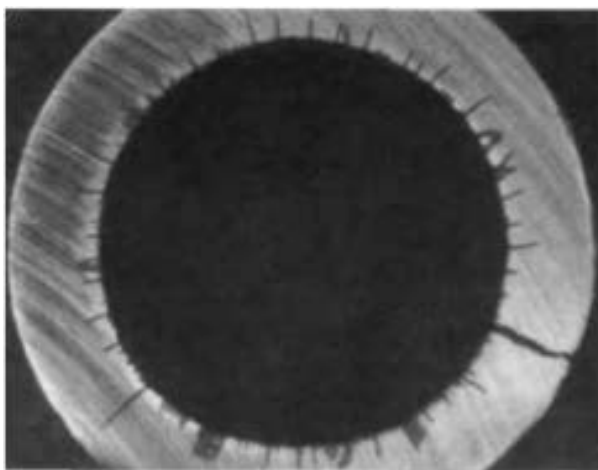


Рис. V.5. Сеть продольных трещин пароперегревателя котла

При высоких температурах, большом количестве циклов до разрушения и низкой частоте нагружения трещины термической усталости носят межкристаллитный характер; при умеренных температурах, больших температурных интервалах термоцикла и малом числе циклов трещины бывают транскристаллитными.

Коррозионность и жаростойкость

Коррозией называют разрушение металлов под действием окружающей среды. При этом часто металлы покрываются продуктами коррозии (ржавеют). В результате воздействия внешней среды механические свойства металлов резко ухудшаются, иногда даже при отсутствии видимого изменения внешнего вида поверхности. Различают *химическую коррозию*, протекающую при воздействии на металл газов и неэлектролитов, и *электрохимическую коррозию*, вызываемую действием электролитов. К электрохимической коррозии относятся также атмосферная и почвенная.

Химическая коррозия

Процесс *химической коррозии* происходит в средах, не являющихся проводниками электрического тока, с образованием на поверхности металлов оксидной пленки. Первопричиной *химической коррозии* является термодинамическая неустойчивость металлов. Протекание *химической коррозии* сопровождается уменьшением термодинамического потенциала системы. По знаку изменения термодинамического потенциала можно определить возможность самопроизвольного протекания *химической коррозии*. Критерием обычно служит изобарно-изотермический потенциал G .

При самопроизвольном протекании химического процесса наблюдается убыль изобарно-изотермического потенциала. Поэтому, если:

$\Delta G_T < 0$, процесс *химической коррозии* возможен;

$\Delta G_T > 0$, процесс *химической коррозии* невозможен;

$\Delta G_T = 0$, система находится в равновесии.

К *химической коррозии* относятся:

- *газовая коррозия* - коррозионное разрушение, протекающее под воздействием газов в среде высоких температур;

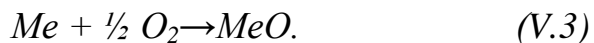
- *коррозия в жидкостях* - неэлектролитах.

Химической коррозии подвержены абсолютно все металлы - и черные, и цветные. Активные цветные металлы (например, алюминий) под воздействием коррозии покрываются оксидной пленкой, препятствующей глубокому окислению и защищающей металл. А такой малоактивный металл, как медь, под воздействием влаги воздуха приобретает зеленоватый налет - патину.

Газовая коррозия - наиболее распространенный вид *химической коррозии*. При высоких температурах поверхность металла под воздействием газов разрушается. Способность металла сопротивляться коррозионному воздействию газовой среды в условиях высоких температур (свыше 550°C) называют *жаростойкостью*.

Явлению газовой коррозии подвержены элементы котлов паровых турбин, оборудование металлургического производства и др.

Самый распространенный случай химической коррозии - взаимодействие металла с кислородом. Процесс протекает по реакции (V.3)



Скорость протекания *газовой коррозии* определяется несколькими факторами: температурой окружающей среды, природой металла или составом сплава, характером газовой среды, продолжительностью контакта с газовой средой, свойствами продуктов коррозии.

При невысоких температурах (около $20 \div 25^\circ C$) на поверхности металла образуются тонкие оксидные пленки, называемые природными. Несмотря на малую толщину ($3 \div 10 \text{ нм}$), они обладают очень хорошими защитными свойствами. Эти невидимые глазом плотные пленки покрывают поверхность металла сплошным слоем. Кристаллическая решетка таких оксидов подобна решетке металла.

Начальная стадия окисления стали - чисто химический процесс. Но дальнейшее течение окисления - уже сложный процесс, заключающийся не только в химическом соединении кислорода и металла, но и в диффузии атомов кислорода и металла через многофазный окисленный слой. При плотной окисной пленке скорость нарастания окалины определяется скоростью диффузии атомов сквозь толщину окалины, что, в свою очередь, зависит от температуры и строения окисной пленки.

Процесс *газовой коррозии* во многом зависит от характера и свойств образовавшейся на поверхности оксидной пленки.

Чтобы оксидная пленка была защитной, она должна отвечать некоторым требованиям: не иметь пор, быть сплошной, хорошо сцепляться с поверхностью, быть химически инертной по отношению к окружающей ее среде, иметь высокую твердость, быть износостойкой.

Если пленка рыхлая и пористая, кроме того, имеет еще плохое сцепление с поверхностью - она не будет обладать защитными свойствами.

Если образовавшаяся оксидная пленка обладает хорошими защитными свойствами - она будет тормозить дальнейшее развитие процесса *химической коррозии*. Кроме того, оксидная пленка очень сильно влияет на *жаростойкость* металла.

Защитные свойства оксидного слоя характеризуют *коэффициент объема* (p , равный отношению атомных масс MeO и Me). При $p=1\div 2,5$ оксидный слой является плотным; при ($p<1$) образуются рыхлые пленки, не закрывающие доступ кислорода к металлу, а при $p>2,5$ оксидная пленка растрескивается и осыпается под действием напряжений из-за большой разницы удельных объемов оксида и металла. Сквозь трещины окислительный компонент среды имеет непосредственный доступ к поверхности. Формируется новая оксидная пленка, а старая - постепенно отслаивается. В последнем случае также наблюдается *плохая жаростойкость*.

Железо с кислородом образует ряд химических соединений: FeO (*вюстит*), Fe_3O_4 (*магнетит*) и Fe_2O_3 (*гематит*). При температурах ниже $570^\circ C$ окисленный слой состоит из двух зон окислов: Fe_2O_3 и Fe_3O_4 . Кристаллическая структура этих окислов сложна, и скорость диффузии в них мала. При температурах выше $570^\circ C$ структура окалины состоит из трех окислов: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и FeO , причем основным слоем окалины является окись FeO . Скорость окисления возрастает при переходе через температуру $570^\circ C$, что является следствием более ускоренной диффузии атомов сквозь простую кристаллическую решетку вюстита, кристаллизующегося, как и фазы внедрения, с дефицитом атомов кислорода.

Для повышения *окалиностойкости* сталь легируют элементами, которые благоприятным образом изменяют состав и строение окалины. Так, в результате введения в сталь соответствующих количеств хрома, алюминия или кремния, обладающих большим сродством к кислороду, чем железо, в процессе окисления на поверхности образуются плотные окислы Cr_2O_3 , Al_2O_3 или SiO_2 , диффузия сквозь которые происходит с трудом.

Образовавшаяся тонкая пленка из этих окислов затрудняет процесс дальнейшего окисления. Чем выше содержание хрома, алюминия или кремния в стали, тем выше *окалиностойкость* стали и тем выше может быть рабочая температура. Бериллий, кобальт, титан и медь очень сильно тормозят окисление. При высоких температурах интенсифицировать процесс окисления могут вольфрам, молибден, а также ванадий. Это объясняется *летучестью* или *легкоплавкостью* их окислов.

Наблюдения за скоростью окисления железа при различных температурах позволили установить, что с увеличением температуры самое медленное окисление наблюдается при аустенитной структуре. Она является наиболее *жаростойкой*, по сравнению с другими.

Важно, что *жаростойкость*, столь существенно зависящая от состава стали или сплава, не зависит от его структуры, т. е. это свойство структурно нечувствительное. *Жаростойкими* являются высоколегированные хромистые стали ферритного и мартенситного класса, хромоникелевые и хромомарганцевые стали аустенитного класса. Чем больше хрома содержит сталь, тем выше максимальная температура ее применения и больше срок эксплуатации изделий.

На скорость протекания *химической коррозии* влияет и характер обработки поверхности. Если поверхность гладкая, то она окисляется немного медленнее, чем бугристая поверхность с дефектами.

Большую роль в процессе коррозии играет состав газовой среды. Но это индивидуально для каждого металла и изменяется с колебаниями температур. Например, медь очень быстро корродирует в атмосфере кислорода, но устойчива в среде, содержащей SO_2 . Никель же, наоборот, интенсивно корродирует при контакте с атмосферой SO_2 , но устойчив в средах O_2 , CO_2 и H_2O . Хром относительно устойчив во всех четырех средах.

Износ оборудования котельных установок при высоких температурах происходит благодаря его контакту с газом, омывающим трубы при большой

скорости. Вместе с газом перемещаются и твердые частицы топлива и шлака (зола), имеющие абразивные свойства.

Скорость окисления оценивают по скорости изменения массы металла ($г/м^2$ в ч) или толщины оксидной пленки (мкм/ч).

Температурные зависимости скорости окисления металла определяют экспериментально в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. По ним оценивают *жаростойкость* металла и максимальную рабочую температуру.

Химическая коррозия в жидкостях-неэлектролитах

Жидкости-неэлектролиты - это жидкие среды, которые не являются проводниками электричества. К ним относятся: органические (*бензол, фенол, хлороформ, спирты, керосин, нефть, бензин*); неорганического происхождения (*жидкий бром, расплавленная сера и т.д.*).

Чистые неэлектролиты не реагируют с металлами, но с добавлением даже незначительного количества примесей процесс взаимодействия резко ускоряется. Например, если нефть будет содержать серу или серосодержащие соединения (*сероводород, меркаптаны*), процесс *химической коррозии* ускоряется. Если вдобавок увеличится температура, в жидкости окажется растворенный кислород - процесс *химической коррозии* интенсифицируется.

Присутствие в жидкостях-неэлектролитах влаги обеспечивает интенсивное протекание коррозии уже по электрохимическому механизму.

Для защиты конструкций от *химической коррозии* в жидкостях-неэлектролитах на ее поверхность наносят покрытия, устойчивые в данной среде. Например, покрытия из чистого никеля.

Электрохимическая коррозия

Электрохимическая коррозия развивается в жидких электролитах: влажных атмосфере и почве; морской и речной воде; водных растворах солей, щелочей и кислот. При *электрохимической коррозии* устанавливается

коррозионный ток и происходит растворение металла вследствие электрохимического взаимодействия с электролитом.

Поверхность металла в электролите *электрохимически неоднородна*, что приводит к образованию *микрогальванического коррозионного элемента*. На одних участках поверхности, называемых *анодами*, идет реакция (V.4); на других, называемых *катодами*, - реакция (V.5) или (V.6).



Чистое железо и низколегированные стали неустойчивы против коррозии в атмосфере, в воде и во многих других средах, так как образующаяся пленка окислов недостаточно плотна и не изолирует металл от химического воздействия среды. Некоторые элементы повышают устойчивость стали против коррозии, и таким образом можно создать сталь (сплав), практически не подвергающуюся коррозии в данной среде.

При введении таких элементов в сталь (сплав) происходит не постепенное, а скачкообразное повышение коррозионной стойкости. Введение в сталь более 12% Cr делает ее коррозионностойкой в атмосфере и во многих других промышленных средах. Сплавы, содержащие меньше 12% Cr, практически в столь же большой степени подвержены коррозии, как и железо. Сплавы, содержащие более 12÷14 % Cr, ведут себя как благородные металлы: обладая положительным потенциалом (рис. V.6), они не ржавеют и не окисляются на воздухе, в воде, в ряде кислот, солей и щелочей.

В отличие от *химической коррозии*, *электрохимическая коррозия* является структурно-чувствительной.

По виду коррозионных разрушений различают следующие виды *электрохимической коррозии*:

- *Сплошная*, или *равномерная* коррозия, которая захватывает всю поверхность металла и приводит к одинаковому утонению стенок труб, узлов и деталей. *Сплошной* коррозии подвержены металлы с однородной структурой (например, однородный твердый раствор). Протекающая

коррозия имеет примерно одинаковую скорость по всей поверхности. Суммарные коррозионные потери при *сплошной* коррозии складываются из потерь на внешнюю и внутреннюю стороны и не должны превышать 1 мм за 100 тыс. ч. эксплуатации.

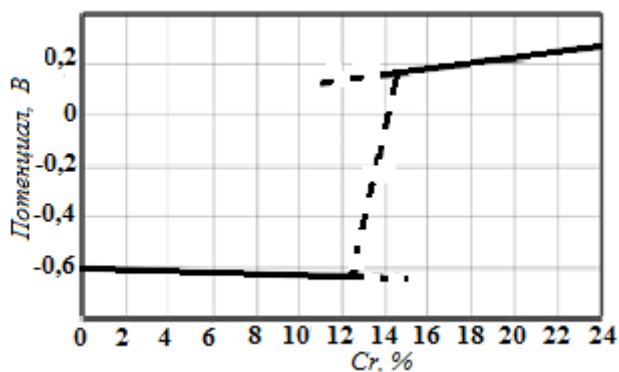


Рис. V.6. Потенциал железохромистых сплавов

- *Местная*, или *неравномерная* коррозия. *Местная* коррозия проявляется в неоднородных металлах и характеризуется локальными поражениями, оставляющими незатронутой значительную или подавляющую часть поверхности. В зависимости от степени локализации различают:

- коррозионные пятна;
- язвы, точки (*питтинг*);
- сквозную коррозию.

Чем больше степень локализации, тем опаснее коррозия, так как *питтинг* существенно уменьшает толщину стенки. К наиболее опасным видам *местной коррозии* относят *межкристаллитную* (интеркристаллитную) коррозию и *транскристаллитную* коррозию. *Межкристаллитная* коррозия продвигается вглубь металла по границам зерен, а *транскристаллитная* коррозия рассекает металл трещиной через зерно.

Наиболее опасна *межкристаллитная* коррозия, вследствие более низкого ее электрохимического потенциала. Коррозия без заметных внешних признаков быстро развивается по границам зерен, вглубь металла, резко снижая при этом механические свойства.

Сталь, пораженная *интеркристаллитной* коррозией, теряет металлический звук и при изгибе дает надрывы по границам зерен в местах коррозионного разрушения металла.

Межкристаллитная коррозия (МКК) аустенитных сталей

Высоколегированные аустенитные стали (*хромоникелевые, хромоникелевольфрамовые, хромоникельмолибденовые и др.*) применяются в турбостроении при температурах выше 580°C . Они *обладают высокой жаропрочностью*, но некоторые из них, например *12X18H9*, обнаруживают склонность к *межкристаллитной коррозии*. *Межкристаллитная коррозия*, разрушая границы зерен, быстро разрушает металл, вследствие чего считается наиболее опасным видом коррозии турбинных материалов.

Причины *межкристаллитной коррозии* связаны с распадом пересыщенного углеродом аустенита, так как растворимость углерода в аустените этих сталей мала и поэтому углерод в них неустойчив.

При нагревании стали до температуры 500°C и выше из γ -твердого раствора выделяются карбиды, богатые хромом, типа Cr_{23}C_6 .

Вначале по границам зерен выделяются мелкодисперсные карбиды. Далее происходит укрупнение и коагуляция карбидов, выпавших по границам зерен. Это явление вызывает обеднение близлежащих участков металла хромом и углеродом, в результате чего вдоль границ зерен аустенита создаются узкие прослойки или зоны бедного хромом твердого раствора, которые обладают резко сниженной коррозионной стойкостью (*рис. V.7*).

Растворимость никеля в аустените больше, чем в феррите, вследствие чего эти участки беднеют также и в отношении никеля. В итоге по границам зерен создается большая разнородность структурных элементов (аустенита, феррита, карбидов), между которыми существует разность потенциалов, которая при наличии электролита приводит к образованию гальванических пар. Разрушение менее стойких обедненных хромом прослоек, располагающихся по границам зерен, происходит под действием

гальванических пар. Благодаря высокой степени начального размельчения карбидов образуется особенно большое количество гальванических пар, разрушающих карбиды.

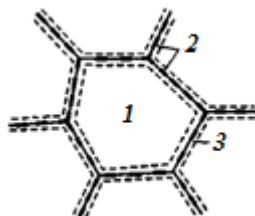


Рис. V.7. Схема структуры аустенитной стали 12Х18Н10 в состоянии, восприимчивом к МКК:

1 – зерно аустенита; 2 – выделения Cr_{23}C_6 ; 3 – обеднённый хромом слой

Межкристаллитная коррозия, постепенно распространяясь вглубь металла, ослабляет связь между его зернами, а затем приводит даже к полной изоляции их друг от друга. Пораженный *межкристаллитной коррозией* металл теряет присущую ему монолитность, прочность и упругость, при этом также изменяются электропроводность и звук, издаваемый образцом металла при падении на каменную плиту. Типичный звонкий металлический звук, издаваемый образцом при падении, сменяется глухим звуком, подобным падающей деревянной пластине.

Межкристаллитная коррозия сталей представляет серьезную опасность для их службы при температурах 500°C и выше в условиях воздействия достаточно агрессивных коррозионных сред. Это обстоятельство усугубляется еще тем, что *межкристаллитная коррозия* может привести к внезапному разрушению детали, не проявляясь заметно до самого момента разрушения. В аустенитных сталях после сварки может развиваться *межкристаллитная коррозия*, особенно в зонах шва, где при сварке температура достигала $550\div 750^\circ\text{C}$.

Для предотвращения *межкристаллитной коррозии* в состав аустенитных сталей вводят титан, ниобий, тантал, которые являются более сильными карбидообразующими элементами, чем хром. Указанные элементы соединяются в карбиды с выделяющимся углеродом, а хром остается в

твердом растворе. Снижение содержания углерода также является фактором, понижающим склонность аустенитных сталей к *межкристаллитной коррозии*. Аустенитные стали с содержанием углерода не более 0,03% не восприимчивы к *межкристаллитной коррозии*.

Кроме того, различают *коррозию под напряжением*, которая возникает при одновременном действии коррозионной среды и напряжений растяжения. Разновидностью этой коррозии является *коррозионное растрескивание*, или *коррозионная усталость*, т. е. образование в металле тонкой сетки трещин, проходящих по объему зерна, при воздействии коррозионной среды и напряжений (рис. V.8).

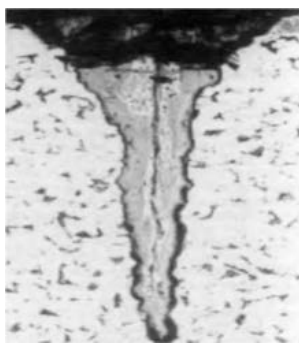


Рис. V.8. Сформированная коррозионно-усталостная трещина

Приведенная на рисунке трещина имеет *транскристаллитный* характер и заполнена оксидами. *Коррозионная усталость* появляется в котлах, которые работают с пиковыми нагрузками, с перерывами. Быстрый запуск или остановка котла могут значительно увеличить вероятность *коррозионной усталости*. Обычными местами появления *коррозионно-усталостных* трещин являются боковые экраны, трубы пароперегревателя, деаэраторы, края топочных трубных экранов. *Коррозионная усталость* обычна в местах прикрепления оборудования, в точках подсоединения к входному или выходному коллектору, затяжках и опорных стойках.

Перечисленные виды коррозионных разрушений представляются весьма опасными, так как их возникновение и развитие происходит скрытно с невозможностью диагностирования и прогнозирования момента внезапного разрушения металла конструкции.

Коррозионностойкие покрытия

Металлические и неметаллические *коррозионностойкие* покрытия являются распространенным средством повышения долговечности изделий при работе в коррозионной среде.

Металлические покрытия по механизму своего влияния делят на *катодные* и *анодные*.

Катодные покрытия изготавливают из более электроположительного металла; они экранируют анодные участки металла и повышают электродный потенциал поверхности. Вследствие высокой коррозионной стойкости эти покрытия долговечны, но не выносят механических повреждений. Если есть царапины, то основной металл при наличии второго катода корродирует быстрее, нежели без покрытия. Покрытое оловом или свинцом (*лужение*) железо и низкоуглеродистые стали являются *катодными*. *Луженую* сталь применяют в пищевой промышленности, а покрытую свинцом - в химической промышленности.

Анодные покрытия изготавливают из более электроотрицательного материала. Разрушаясь, он предохраняет металл от коррозии. При механических повреждениях такое покрытие выполняет роль дополнительного более электроотрицательного анода, который забирает большую долю коррозионного тока и тем самым защищает основной анод. *Анодные покрытия* применяют при атмосферной и морской коррозии. Например, *анодными* для железа и углеродистых сталей являются покрытия цинком или кадмием.

Неметаллические покрытия представляют собой вещества с ионным или молекулярным типом связи, являющимися по своим электрическим свойствам диэлектриками или полупроводниками. Вследствие большого омического сопротивления *электрохимическая коррозия* в них не развивается. Ионным типом связи обладают покрытия из оксидов, создаваемые на сталях при нагреве на воздухе, или при анодировании

алюминия. Высокомолекулярные соединения входят в состав лаковых покрытий, а также совместно с оксидами в состав красок и эмалей.

Неметаллические высокомолекулярные покрытия во многих случаях легко отслаиваются и разрушаются при относительно небольших нагрузках. В некоторых случаях предпочитают изготавливать детали и элементы конструкций целиком из полимеров и пластмасс, что обеспечивает конструкции долговечность в эксплуатации.

§ V.2. Железоуглеродистые сплавы для электро- и теплоэнергетики

V.2.1. Материалы котельных установок и паровых турбин

Основное значение при выборе материалов котельных установок и паровых турбин имеют температура эксплуатации, время работы под нагрузкой в условиях высоких температур и действующие напряжения.

Сплавы, работающие при повышенных температурах (*более 500°C*) называются жаропрочными.

V.2.1.1. Жаропрочные материалы котельных установок и паровых турбин

Жаропрочные металлы используют в газовых турбинах самолетов и кораблей, промышленных энергетических установках и автомобилях, в космических кораблях, ракетных двигателях, нефтехимическом оборудовании и других объектах, работающих при высоких температурах. К числу деталей, работающих при указанных и более высоких температурах, относятся рабочие и направляющие лопатки газовых турбин, диски и корпуса камер сгорания ракетных двигателей и т. п. К материалам, работающим определенное время при высоких температурах, независимо от их назначения, предъявляют комплекс требований, основным из которых является *жаропрочность*.

Жаропрочностью называется сопротивление пластической деформации при длительном воздействии нагрузки в области повышенных

температур. Кроме того, *жаропрочные* сплавы, работающие при повышенных температурах, должны обладать хорошей *жаростойкостью* и технологичностью. Конкретный выбор материалов для изготовления тех или иных деталей определяется условиями их службы. Так, для рабочих лопаток турбин, которые в процессе работы подвергаются растягивающим напряжениям порядка 140 МПа при переменных температурах от 650 до 1000°C кроме высокой жаропрочности материал должен обладать соответствующей пластичностью, сопротивлением циклической и термоциклической усталости (нагрев - охлаждение), низким коэффициентом термического расширения, повышающим сопротивление термической усталости, иметь высокую стойкость к окислению при взаимодействии с продуктами сгорания топлива.

Жаропрочные материалы можно разделить на четыре группы: 1) *жаропрочные стали*; 2) *стареющие сплавы*, 3) *искусственные композиционные материалы* (упрочненные дисперсными частицами или волокнами тугоплавких либо высокопрочных соединений; 4) *естественные волокнистые материалы* – *направленно-закристаллизованные* эвтектики.

Естественным путем повышения *жаропрочности* является выбор более тугоплавких металлов. Но даже в сплавах на одной и той же основе температурный интервал *жаропрочности* можно значительно повысить путем легирования. Повышение *жаропрочности* при легировании тугоплавкими элементами (*Mo*, *Cr*, *Ta*, *Nb* и др.) обусловлено в основном замедлением процессов диффузии. Легирование упрочняет основу сплава, повышает температуру рекристаллизации. Легирование относительно нетугоплавкими элементами, такими как алюминий и титан, повышает *жаропрочность* за счет выделения упрочняющих интерметаллидных фаз.

Наконец, совместное легирование углеродом и карбидообразующими элементами - *ванадием*, *хромом*, *танталом*, *молибденом* и др., способствуя карбидному упрочнению, увеличивает и *жаропрочность*. Иногда сочетают карбидное упрочнение с интерметаллидным.

Для получения максимальной *жаропрочности* важно создать не только определенную микроструктуру (т.е. выделение и распределение тех или иных упрочняющих фаз), но и обеспечить получение определенной макроструктуры (размера и формы зерен). Это требование обусловлено тем, что при высоких температурах по границам зерен происходит проскальзывание, причем доля проскальзывания может достигать 90% общей деформации. Увеличение размера зерна приводит к уменьшению площади границ зерен и снижает скорость ползучести. Следовательно, более высокие свойства будут у сплавов с крупным зерном. Не случайно сейчас в технике развиваются методы получения литых монокристаллических деталей, в которых границы зерен вообще отсутствуют. Наряду с необходимостью увеличения размеров зерна требуется воздействовать и на состояние границ зерен. Легирование сплавов бором, церием, гафнием и другими элементами приводит к затруднению проскальзывания.

Еще одним путем, используемым для повышения *жаропрочности*, является улучшение технологии выплавки. Наиболее эффективным и перспективным металлургическим методом улучшения *жаропрочности* является использование направленной кристаллизации, при которой получается специально ориентированная структура, способствующая повышению длительной прочности при температуре эксплуатации сплава. Рабочие температуры сплавов, применяемых для изготовления лопаток газовых турбин, можно повысить с 900 до 1000°C методом направленной кристаллизации.

V.2.1.2. Углеродистые стали

Для изготовления котлов, пароперегревателей и паропроводов применяют специальные *жаропрочные стали*.

Перлитные, мартенситные и аустенитные *жаропрочные стали* используют при температуре 450÷700°C. По масштабам применения они занимают ведущее место среди *жаропрочных материалов*.

Перлитные стали предназначены для длительной (100 тыс. ч. и более) эксплуатации при температуре $450\div 580^{\circ}\text{C}$. Используют главным образом в котлостроении.

Для изготовления котлов, пароперегревателей и паропроводов применяют жаропрочные стали марок 12Х1МВ. Хром введен для улучшения окалиностойкости, молибден и ванадий - для повышения жаропрочности до 570°C . Совместное легирование ванадием и хромом препятствует процессу графитизации за счет стабилизации карбидов после термической обработки: нормализации при температуре около 1000°C и последующего отпуска при температуре $650\div 750^{\circ}\text{C}$ в течение $2\div 3$ ч.

Паропроводы и коллекторы, работающие при $570\div 575^{\circ}\text{C}$, изготавливают из стали 15Х1М1В. Она немного дороже стали 12Х1МВ, содержит больше дефицитного молибдена, но обладает несколько большей *жаропрочностью*. На свойствах стали 15Х1М1В меньше сказывается скорость охлаждения. Если для обеспечения высокой *жаропрочности* труб с толщиной стенки более 45 мм из стали 12Х1МВ необходима закалка, то толстостенные трубы из стали 15Х1М1В имеют высокую *жаропрочность* при охлаждении на воздухе после нагрева выше $A_{с3}$.

Для внутренних корпусов двухстенных ЦВД чаще всего используют сталь 15Х1МВН. Иногда для внутренних корпусов используют нержавеющую сталь 15Х11МВН, легированную хромом, молибденом, ванадием и ниобием.

Для внешних корпусов ЦВД применяют менее жаропрочные и более дешевые стали 20ХМВН и 20ХМН, а в некоторых случаях используется сталь 15ХМВН, что позволяет уменьшить толщину стенки и фланцев.

Самыми напряженными элементами корпусов ЦВД и ЦСД являются скрепляющие фланцы шпильки или болты. Материал этих деталей должен обладать высоким пределом текучести, обеспечивающим упругое растяжение при затяжке, высокой релаксационной стойкостью, обеспечивающей плотность разъема в период между капитальными

ремонтами, малой склонностью к появлению трещин в резьбе. Для крепежа, работающего при $520\div 535^{\circ}\text{C}$ и $500\div 510^{\circ}\text{C}$, наиболее употребительными являются стали соответственно 25Х2МВ и 25Х1МВ. Для зон с температурой менее 400°C используется хромомолибденовая сталь 35ХМ, а менее 300°C - углеродистая сталь 35.

Для диафрагм ЦВД и ЦСД используют легированные стали 15Х1М1В, 12ХМВ и 20ХМ.

Сопловые лопатки и бандажные ленты сварных диафрагм изготавливают из нержавеющей хромистых сталей.

К материалам высокотемпературных цельнокованых роторов ТЭС предъявляются два основных требования: они должны иметь высокое сопротивление ползучести и термической усталости. Наиболее распространенными являются перлитные стали 25ХМВ и 20Х3МВН, обладающие высоким сопротивлением ползучести. Рекомендуемая температура применения до $500\div 560^{\circ}\text{C}$.

Жаропрочные сплавы на основе алюминия, магния и титана легче сталей, однако они менее жаропрочны. Используют их при следующих температурах: сплавы алюминия до $300\div 350^{\circ}\text{C}$ (исключением являются сплавы САП - спеченная алюминиевая пудра, которые можно применять до $500\div 550^{\circ}\text{C}$); сплавы магния до $300\div 350^{\circ}\text{C}$, сплавы титана до $500\div 600^{\circ}\text{C}$.

Ниже 450°C вполне пригодны обычные углеродистые конструкционные стали, и нет необходимости заменять их жаропрочными.

Тугоплавкие металлы и их сплавы, керамика на основе SiC и Si_3C_4 , графит - это материалы с высокой жаропрочностью, применяемые при температурах выше 1000°C .

Для изготовления деталей котлов, вспомогательного оборудования и трубопроводов широко применяются низкоуглеродистые стали.

Низкоуглеродистые стали содержат до 0,25% углерода, до 0,8% марганца и до 0,4% кремния (остающихся после раскисления), а также вредные примеси - до 0,055% серы и до 0,045% фосфора. Эти стали хорошо

поддаются обработке давлением, гибке и правке в горячем и холодном состоянии, хорошо свариваются.

Низкоуглеродистые стали относительно дешевы, не дефицитны и обладают удовлетворительными механическими свойствами при комнатной и повышенных температурах (до 450°C).

В котлостроении низкоуглеродистая сталь, поставляемая по ГОСТ 1050-88, 5520-79, применяется после нормализации для элементов котлов низкого и среднего давления, а также в виде листа и проката элементов котлов и трубопроводов, работающих при относительно низких температурах и давлениях.

Стальные листы применяются для изготовления корпусов котлов низкого давления, для барабанов и их днищ, для плоских донных коллекторов, для многих элементов котлов, не подверженных нагрузкам внутренним давлением, а также для изготовления корпусов сосудов давления, входящих в состав котельной установки (деаэраторов, барботеров, фильтров водоподготовки и др.). Для изготовления котлов низкого давления используются листы из углеродистой стали обыкновенного качества Ст2кп, Ст3кп, ВСт3кп, ВСт3пс, Ст3сп, Ст3Гпс и др.

Для изготовления элементов котлов с более высокими параметрами пара применяются листы из сталей 10, 15, 15К, 20К, а также стальные листы, поставляемые по специальным техническим условиям. Качественные углеродистые стали используют для изготовления крепежных деталей корпусов ЦВД и ЦСД (фланцы, шпильки, болты), работающих при температуре менее 300°C . Материал этих деталей должен обладать высоким пределом текучести, обеспечивающим упругое растяжение при затяжке, высокой релаксационной стойкостью, обеспечивающей плотность разъема в период между капитальными ремонтами, малой склонностью к появлению трещин в резьбе. Углеродистые конструкционные стали марок 15Л, 20Л, 45Л и др. используют для получения деталей и элементов паровых турбин,

получаемых методом литья. В табл. V.3 приведены марки углеродистых сталей и область их применения.

Таблица V.3

Область применения некоторых углеродистых сталей, ГОСТ 1050-88, 5520-79

Марка	Область применения
ВСтЗГпс	Фасонный и листовой прокат толщиной 10-36 мм для несущих элементов сварных конструкций, работающих при переменных нагрузках и температуре до 425 °С, при условии гарантированной свариваемости.
ВСтЗкп	Для изготовления котлов низкого давления, работающих при температуре до 400 °С.
10 15	Изготовление котлов высокого давления, трубопроводы и др. детали, работающие длительный срок при температуре до 450 °С.
12К 16К	Изготовление деталей, частей котлов и сосудов, работающих под давлением при комнатной, повышенной и пониженной температурах.
15К 20К	Применяется для изготовления фланцев, днищ, цельнокованых и сварных барабанов паровых котлов, корпусов аппаратов и других
Элементы крепежа и соединительные элементы (фланцы, шпильки, болты), работающие при температуре до 300 °С.	
15Л 25Л 45Л	Корпуса паровых турбин, арматура паропроводов, диафрагмы, обоймы.

Стали ферритного класса марок 10Х13 и 20Х13 целесообразно применять до 450÷500°С, для изготовления лопаток паровых турбин, бандажей и бандажной проволоки. Содержание 12÷14 % хрома, обеспечивает высокую коррозионную стойкость. Их большим достоинством является высокая, значительно большая, чем у других лопаточных материалов, демпфирующая способность.

Стали мартенситно-ферритного класса марок 10Х12ВНМФ и 15Х12ВМФ применяют для изготовления лопаток, роторов, дисков, диафрагм и других деталей паровых турбин с максимальной рабочей температурой до 580°С.

Для паропроводов и пароперегревателей сверхкритических параметров применяют сталь 10Х11В2МФ (ЭИ756). Эта сталь удовлетворительно сваривается и обладает более высокими жаропрочными свойствами, чем стали перлитного класса.

Мартенситные стали предназначены для изделий, работающих при 450÷600°С от перлитных отличаются повышенной стойкостью к окислению в

атмосфере пара или топочных газов. По *жаропрочности* они превосходят перлитные.

Различают две группы мартенситных сталей:

- стали с содержанием хрома $10\div 12\%$, добавками *Mo*, *V*, *Nb*, *W* и низким ($0,10\div 0,15\%$) содержанием углерода;
- *сильхромы* с содержанием хрома 5-10 %, добавками кремния в количестве до 2-3 % и повышенным содержанием углерода (до 0,4 %).

Стали первой группы (15X11МФ, 11X11Н2В2МФ) используют в термически обработанном состоянии. Оптимальная термическая обработка заключается в закалке или нормализации после нагрева до $950\div 1100^{\circ}\text{C}$ (для растворения карбидов) и отпуске при $600\div 740^{\circ}\text{C}$. Структура термически обработанной стали - смесь легированного феррита и мелких карбидов - обеспечивает необходимую жаропрочность, сопротивление коррозии и релаксационную стойкость.

Предназначены для изделий, работающих при $450\div 600^{\circ}\text{C}$; от перлитных они отличаются повышенной стойкостью к окислению в атмосфере пара и топочных газов. По жаропрочности они превосходят перлитные.

Мартенситные стали данной группы имеют разнообразное применение в паровых турбинах: диски, лопатки, бандажы, диафрагмы, роторы, а также и крепежные детали.

Для больших температур применяют стали, легированные молибденом и ванадием (15X11МФ), а также вольфрамом и ниобием (20X11МФБН, 15X12ВМФ, 20X12МБФР) и некоторые другие.

Стали второй группы - *сильхромы* - характеризуются повышенной жаростойкостью в среде горячих выхлопных газов и используются для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания.

Оптимальные свойства *сильхромы* имеют после обработки на сорбит. Так, сталь 40X10C2М закалывают после нагрева до 1030°C и отпускают при $720\div 780^{\circ}\text{C}$. Чем больше содержания хрома и кремния в стали, тем выше ее

рабочая температура. Жаропрочность *сильхромов* позволяет применять их при температурах не выше $600\div 650^{\circ}\text{C}$; при более сложных условиях эксплуатации клапаны мощных двигателей изготавливают из *аустенитных сталей*.

Сильхромы не содержат дорогих легирующих элементов и используются не только для клапанов двигателей, но и для крепежных деталей моторов.

Технологические свойства *сильхромов* хуже, чем у перлитных сталей. Особенно затруднена их сварка, требуются подогрев перед сваркой и последующая термическая обработка.

Аустенитные стали по жаропрочности превосходят перлитные и мартенситные стали, используют их при температурах выше 600°C . Основные легирующие элементы - хром и никель. Соотношение между ними выбирают таким, чтобы получить устойчивый аустенит, не склонный к фазовым превращениям.

Аустенитные стали отличаются большой пластичностью, хорошо свариваются, однако по сравнению с перлитными сталями труднее обрабатываются резанием из-за высокой пластичности и упрочнения при резании (наклёпываются).

Для изготовления пароперегревателей и паропроводов применяют стали марок 12X18H10T - до 600°C , 10X11H20T - до 700°C . Недостаток сталей *аустенитного* класса - образование трещин в зоне термического влияния сварных швов паропроводов. Основные легирующие элементы - хром и никель. Соотношение между ними выбирают таким, чтобы получить устойчивый аустенит, не склонный к фазовым превращениям.

Для лопаток, дисков и роторов паровых турбин применяют стали X16H13M2Б, работающие при температуре до 600°C .

Температура направляющих и рабочих лопаток газовых турбин выше, чем паровых турбин, поэтому детали газовых турбин необходимо делать из

более жаропрочных сталей. Лопатки газовых турбин и крепежные детали, работающие при 650°C , изготавливают из стали Х15Н35В3Т. Для деталей, работающих при еще более высоких температурах, применяют сплавы на никелевой основе, ХН70ТЮР (20 % хрома).

Аустенитные жаропрочные стали подразделяют на три группы:

- однофазные стали, не упрочняемые термической обработкой;
- стали с карбидным упрочнением;
- стали с интерметаллидным упрочнением.

Однофазные стали имеют устойчивую структуру однородного аустенита с незначительным содержанием карбонитрида титана или ниобия (для предупреждения межкристаллитной коррозии). Такая структура получается после закалки от $1020\div 1100^{\circ}\text{C}$. Стали этой группы применяют как жаропрочные в теплоэнергетике (например, 12Х18Н10Т).

Жаропрочность однофазных сталей увеличивают при помощи наклепа, пользуясь тем, что температура рекристаллизации *аустенитных* сталей высока (около 1000°C). Другой путь создания жаропрочности - создание полигонизованной структуры.

Аустенитные стали с карбидным упрочнением обычно содержат несколько карбидообразующих элементов: *W*, *Mo*, *Ti*, *Nb*, *V*, а также *B* - для обеспечения наивысшей жаропрочности. Из-за высокого содержания ферритообразующих элементов содержание никеля повышают до 14%. Оптимальная структура получается после закалки от $1100\div 1150^{\circ}\text{C}$ и старения полученного аустенита при $700\div 800^{\circ}\text{C}$ для выделения карбидов.

Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением - самые жаропрочные. Стали легируют *Cr*, *Mo*, *W*, добавки *Al*, *Ti*, *Nb* и *Ta* служат для формирования выделений упрочняющей фазы типа Ni_3Al . Их упрочняют закалкой и старением.

Например, сталь 10Х11Н20ТЗР закаливают от $1100\div 1170^{\circ}\text{C}$ и старят при $700\div 750^{\circ}\text{C}$ в течение $15\div 25$ ч. *Аустенитные* стали отличаются большой

пластичностью, хорошо свариваются, однако по сравнению с перлитными сталями труднее обрабатываются давлением и резанием.

Жаропрочные никелевые сплавы содержат, как правило, 10-12 % *Cr* и такие элементы, как *W*, *Mo*, *V*, *Co*, *Al*, *Ti*, *B* и др. Термическая обработка сплавов заключается в закалке и старении. Детали нагревают до $1150\div 1250^{\circ}\text{C}$ для получения однородного раствора и охлаждают на воздухе.

Никелевые жаропрочные сплавы широко применяют благодаря их высокой прочности, коррозионной стойкости и жаропрочности. Помимо основного назначения - изготовление лопаток и других ответственных деталей современных газотурбинных двигателей, - эти сплавы применяют для производства штампов и матриц горячего деформирования металлов. Их используют при температурах от 750°C , но не выше $950\div 1000^{\circ}\text{C}$.

Недостаток *жаростойкости* исправляется химико-термической обработкой деталей, в частности *алитированием* и *хромоалитированием*. Жаропрочные никелевые сплавы с трудом подвергаются горячему деформированию и резанию. Как и аустенитные стали, они имеют низкую теплопроводность и значительное тепловое расширение.

§ V.3. Титановые, медные и алюминиевые сплавы

V.3.1. Титан и его сплавы

Титан - тугоплавкий металл серебристо-белого цвета с плотностью $\rho = 4,505 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления 1672°C . Может находиться в двух полиморфических модификациях: Ti_{α} до 882°C с гексагональной плотноупакованной решеткой и высокотемпературной Ti_{β} выше этой температуры с объёмноцентрированной кубической решеткой до температуры плавления.

Удельная прочность титана выше, чем у многих легированных конструкционных сталей, поэтому при замене сталей титановыми сплавами

можно при равной прочности уменьшить массу детали на 40%. Титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается, из него можно изготовить сложные отливки, но обработка резанием затруднительна. Для получения сплавов с улучшенными свойствами его легируют алюминием, хромом, молибденом.

Высокая удельная прочность и жаропрочность в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью и практическое отсутствие хладноломкости важнейшее преимущество *титана и титановых сплавов* перед другими конструкционными материалами. Кроме того, титан и его сплавы, несмотря на плохую обрабатываемость резанием, хорошо свариваются, обрабатываются давлением в холодном и горячем состоянии, термически упрочняются, что имеет важное значение для их применения в ряде отраслей техники. Это относится в первую очередь к авиа-, ракето- и судостроению, химическому, пищевому и транспортному машиностроению [13,14,15].

Титан и его сплавы маркируют буквами "ВТ" и порядковым номером: ВТ1-00, ВТ3-1, ВТ4, ВТ8, ВТ14. Имеет высокие механические свойства $\sigma_B = 300 \text{ МПа}$, $\delta = 40\%$, не имеет температурного порога хладноломкости, парамагнитен. Титан легкий, прочный, тугоплавкий, коррозионностойкий за счет возникновения оксидной пленки TiO_2 .

Механические свойства титана определяются составом: чем в нем меньше примесей, тем ниже прочность и выше пластичность (рис. V.9).

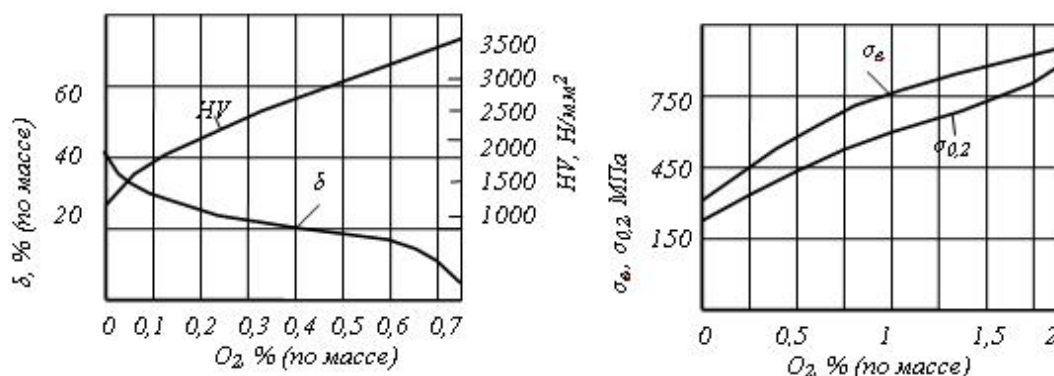


Рис. V.9. Влияние примеси кислорода на механические свойства титана

Характерная особенность титана — необычайно высокая чувствительность к примесям атмосферных газов — кислороду, азоту,

водороду и углероду, которые образуют с титаном твердые растворы внедрения и промежуточные фазы: оксиды, нитриды, гидриды, карбиды, повышая его характеристики прочности и снижая пластичность.

Кроме того, ухудшается обработка давлением, свариваемость и коррозионная стойкость. Поэтому содержание этих примесей ограничивается сотыми и тысячными долями процента.

Полиморфизм титана, хорошая сплавляемость с другими металлами дает широкие возможности получения сплавов на основе титана с самыми разными механическими свойствами благодаря легированию, термической обработке, деформационному упрочнению.

Элементы, легирующие титан, подразделяются на:

- повышающие температуру полиморфного превращения и расширяющие область существования α -модификации: *Al, Ga, La, C, O, N*;
- понижающие температуру полиморфного превращения и расширяющие область существования β -модификации: *Mo, V, Nb, Ta, Hf, W, Cr, Mn, Fe, Co* и другие.

Алюминий является основным легирующим элементом для титана и содержится почти во всех промышленных сплавах. Образуя с титаном твердый раствор, он повышает удельную прочность сплава, жаропрочность, модуль упругости, уменьшает склонность к водородной хрупкости. Из-за уменьшения технологической пластичности содержание *Al* ограничивается 7%.

Для повышения рабочих характеристик жаропрочных сплавов с высоким содержанием алюминия главным образом используют добавки *ванадия, молибдена и вольфрама*.

Цирконий повышает термическую стабильность, увеличивает предел ползучести, прочность при низких и средних температурах, уменьшает склонность к хладноломкости и улучшает свариваемость.

Хром считается одной из наиболее перспективных легирующих добавок к титану наряду с молибденом. Сплавы титана с хромом отличаются превосходным сочетанием прочности и пластичности (рис. V.10).

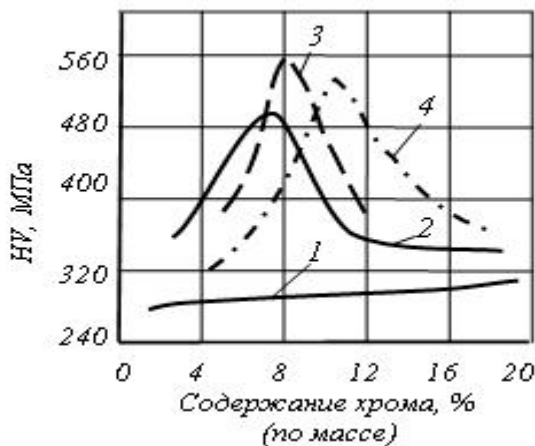


Рис. V.10. Твердость сплавов титана с различным содержанием хрома после отжига при температуре 600 °С (1) и охлаждения из β -области с различными скоростями: резкая закалка в растворе щелочи (2), закалка в воде (3), охлаждение на воздухе (4)

Ниобий — повышает стабильность поверхности, увеличивает жаростойкость при высоких температурах.

В связи с определенным характером действия на титан различных легирующих элементов промышленные сплавы по типу структуры могут быть подразделены на три группы: титановые сплавы на основе Ti_α , сплавы на основе Ti_β и двухфазные ($\alpha+\beta$)-титановые сплавы.

Промышленные титановые сплавы с ($\alpha+\beta$)-структурой целесообразно подразделить на три группы: псевдо- α -сплавы с небольшим количеством β -фазы (Ti_β) со свойствами, близкими к α -сплавам (Ti_α), типичные ($\alpha+\beta$)-сплавы и псевдо- β -сплавы. Псевдо- β -сплавы представляют собой сплавы на основе Ti_β . В отожженном состоянии их физико-механические и технологические свойства типичны для β -сплавов, однако β -фаза у этих сплавов термически нестабильна.

По уровню характеристик прочности титановые сплавы классифицируют на высокопластичные и малопрочные, среднечные и высокопрочные, жаропрочные, коррозионно-стойкие.

По способности упрочняться с помощью термической обработки титановые сплавы классифицируют на *упрочняемые* и *не упрочняемые*. По технологии производства – на *деформируемые* и *литейные*.

Деформируемые титановые сплавы с α -структурой, содержащие в основном алюминий, характеризуются невысокой прочностью и не упрочняются при термической обработке. Они хорошо свариваются и имеют высокие механические свойства при криогенных температурах, устойчивы против коррозии в атмосферной среде, загрязненной газами до температуры 1090°C сохраняют высокую прочность при нагреве до 650°C (BT5–1, OT4–0, OT4, BT20, BT18, BT–6, BT14, BT3–1, BT25 и др.). Однако их пластичность хуже, чем у двухфазных сплавов.

Двухфазные титановые ($\alpha+\beta$)-сплавы характеризуются хорошим сочетанием механических и технологических свойств. Эти сплавы обладают почти удвоенной прочностью по сравнению с чистым титаном, однако эта прочность сохраняется до температуры 430°C . Большинство этих сплавов лучше поддаются деформированию, чем однофазные сплавы. Но их сварка затруднена, т.к. они при сварке теряют пластичность, а швы приобретают хрупкость. По структуре после закалки в них образуется структура мартенситного типа.

Увеличение количества β -фазы в сплавах до 50% обеспечивает двухфазным титановым сплавам самую высокую прочность как в отожженном, так и в закалённом состояниях.

Однофазные β -сплавы имеют наиболее высокую коррозионную стойкость. Сплавы с β -структурой реже применяются в промышленности из-за чувствительности к загрязнению газами при нагреве.

Литейные титановые сплавы (BT1Л, BT14Л, BT5Л и др.) имеют небольшой температурный интервал кристаллизации, высокую жидкотекучесть и хорошую плотность отливки. Титановые сплавы этой категории склонны к поглощению газов, поэтому разливку надо проводить в

вакууме или в среде нейтральных газов. Для получения отливок используют чугунные или стальные формы, а также оболочковые и керамические формы.

Деление конструкционных титановых сплавов по типу структуры и характеристик прочности, их химический состав приведены в *таблице V.3.*

Таблица V.4

*Классификация промышленных титановых сплавов
и их механические свойства*

Тип сплава	Марка сплава	Средний химический состав, %	Уровень прочности	Механические свойства	Технология получения	
σ_B , МПа	δ , %					
α -сплавы	BT1-0	99,28% Ti	М.п.*	350–500		деформируемый
BT5	5% Al	С.п.	750–900			
BT5-1	5% Al; 2,5% Sn	С.п.	750–900			
BT5Л	5% Al	М.п.	700–900		литейный	
псевдо- α -сплавы	OT4-1	1,5% Al; 1% Mn	М.п..	600–750		деформируемый
AT-2	2% Zr; 1% Mo	М.п.	600–750			
BT20	6% Al; 1% Mo; 1% V	С.п.	950–1150			
TC5	5% Al; 2% Zr; 3% Sn; 2% V	В.п.	950–110			
BT20Л	6% Al; 2% Zr; 1% Mo	С.п.	≥ 1000	≤ 4	литейный	
($\alpha+\beta$)-сплавы	BT6C	5% Al; 4% V	С.п.	850–1000		деформируемый
BT3-1	6% Al; 2,5% Mo; 2% Cr; 0,3% Si; 0,5% Fe	В.п.	1000–1200			
BT14	4,5% Al; 3% Mo; 1% V	В.п.	900–1070			
BT22	5% Al; 5% Mo; 5% V; 1% (Fe, Cr)	В.п.	1100–1250			
BT14Л	5% Al; 3% Mo; 1% V; 0,5% (Cr, Fe)	В.п.			литейный	
Псевдо β -сплавы	BT-15	3% Al; 7% Mo; 11% Cr	В.п.	1350–1500		деформируемый
TC6	3% Al; 5% Mo; 6% V; 11% Cr	В.п.	1400–1500			
β -сплавы		33 %Mo	С.п.	800–850		деформируемый, коррозионност.

* – М.п. – малопрочные (высокопластичные), С.п. – среднепрочные, В.п. – высокопрочные

Для фасонного литья применяют сплавы, близкие по химическому составу некоторым деформируемым сплавам (BT5Л, BT14Л), а также специальные литейные сплавы.

Титановые сплавы подвергаются следующим видам термической обработки: отжигу для снятия напряжений, рекристаллизационному отжигу, упрочняющей термической и химико-термической обработке.

Упрочняющая термическая обработка $(\alpha+\beta)$ -сплавов состоит из закалки с температур нагрева до β - или $(\alpha+\beta)$ -области с последующим искусственным старением. После закалке образуется α -фаза (мартенситная фаза) игольчатого строения, представляющая собой пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в α -фазе. При старении из α -фазы выделяется β -фаза, понижающая твердость сплава, или интерметаллидная фаза, вызывающая охрупчивание.

При закалке из β -области структура сплавов состоит из переохлажденного β -твердого раствора. При старении из такого раствора выделяется мелкодисперсная α -фаза, повышающая прочность и твердость сплава.

Для повышения жаростойкости детали из титановых сплавов подвергают различным видам диффузионной металлизации, а для повышения износостойкости – азотированию.

V.3.2. Медь и её сплавы

Медь действительно цветной металл: в зависимости от чистоты и состояния поверхности цвет изменяется от розового до красного. Её порядковый номер 29, имеет кристаллическую решетку ГЦК с периодом решетки $0,3608\text{ нм}$. Медь плавится при температуре 1083°C , не имеет полиморфных превращений, её удельный вес составляет $8,94\text{ г/см}^3$. Медь обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, имеет высокие технологические свойства: хорошо паяется, сваривается, легко

обрабатывается давлением. В отожженном состоянии предел прочности меди составляет $200 \div 250$ МПа при относительном удлинении $40 \div 50\%$. По ГОСТ 859–78 производится 11 марок меди в зависимости от содержания примесей, например: М00 содержит 99,99% Cu, М0 – 99,97% Cu, М2 – 99,7% Cu и т. д. [16].

Благодаря высокой электропроводности медь нашла широкое применение в электротехнике. Из меди изготавливают шины, ленты, кабели, обмотки электродвигателей и др. Примеси изменяют свойства меди. Понижают электропроводность примеси, которые образуют с медью твёрдые растворы: фосфор, мышьяк, алюминий, олово.

Высокая теплопроводность меди делает её пригодной для водоохлаждаемых тиглей, кристаллизаторов, поддонов и изложниц для отливки титана и др.

На механические свойства меди примеси влияют незначительно, в большей мере они зависят от состояния (литое или деформированное).

Для повышения прочности медь легируют цинком, алюминием, оловом, никелем, железом или подвергают холодной пластической деформации. В результате холодной пластической деформации медь наклёпывается и её временное сопротивление разрыву может достигать $400 \div 450$ МПа, при одновременном снижении пластичности и электропроводности на $2 \div 4\%$.

Восстановить пластичность меди можно рекристаллизационным отжигом при температуре $500 \div 600^\circ\text{C}$.

Медные сплавы по технологическим свойствам подразделяются на *деформируемые* (при получении листов, полос, профилей, проволоки) и *литейные* (при получении отливок в песчаные или металлические формы).

По способности упрочняться в результате нагрева медные сплавы делятся на *упрочняемые* и *не упрочняемые* термической обработкой. По химическому составу более широко известно деление медных сплавов на *латуни* и *бронзы* (рис. V.11).

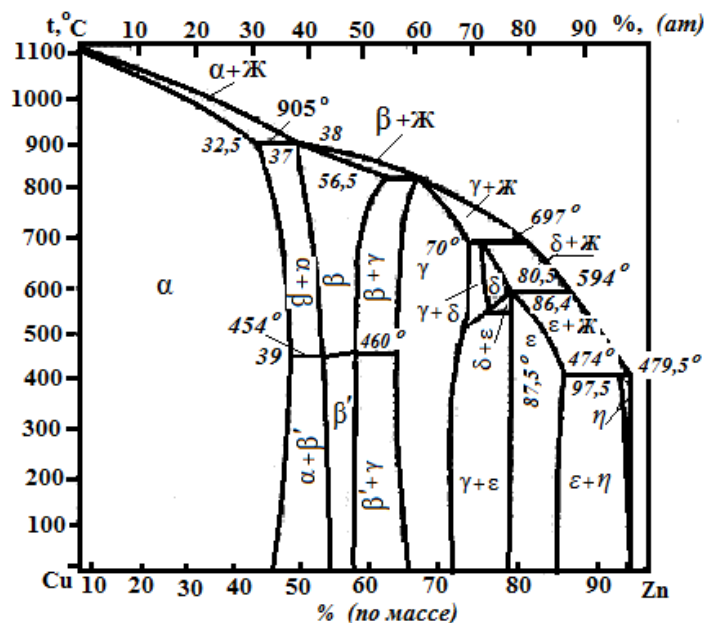


Рис. V.11. Диаграмма состояния системы «Cu – Zn»

В латунях главным легирующим элементом является цинк. Латуни получили широкое распространение благодаря сочетанию высоких механических и технологических свойств. Структура и свойства латуней определяется диаграммой состояния «Cu–Zn». Содержание цинка в кристаллической решетке может достигать 39%. Латуни, состоящие из меди и цинка, называют *простыми*. Они могут быть однородными (до 39% цинка) и двухфазными (более 39% цинка). Однофазные латуни имеют высокую пластичность, т. к. состоят из однофазного α -твёрдого раствора. Двухфазные латуни при наличии β -фазы имеют более высокую прочность, но пластичность при этом снижается (рис. V. 12).

Простые латуни маркируются буквой «Л» и цифрой, показывающей процентное содержание меди. Латунь Л80 содержит 80% меди и 20% цинка. Простые латуни поставляются в виде листов, ленты, прутков, проволоки и согласно ГОСТ 15527–70 имеют обозначение Л96, Л90, ..., Л59.

Специальные (многокомпонентные) латуни содержат и другие легирующие элементы: Al, Ni, Mn, Sn и др. Алюминий, кремний, марганец и никель повышают механические свойства латуни и сопротивление коррозии, а свинец улучшает обрабатываемость резанием.

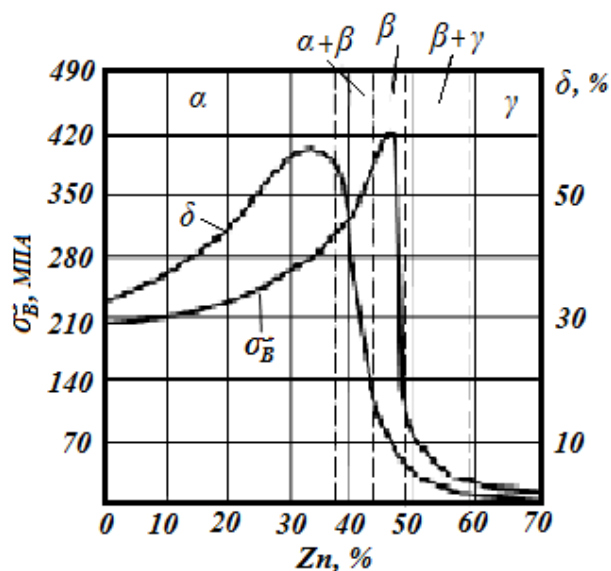


Рис. V.12. Влияние содержания цинка на свойства латуней

В специальных латунях после буквы «Л» следуют буквы русского алфавита, обозначающие легирующий элемент: *A* – *Al*, *H* – *Ni*, *K* – *Si*, *C* – *Pb*, *O* – *Sn*, *Ж* – *Fe*, *Мц* – *Mn*, *Ф* – *P*, *Б* – *Be*, *Ц* – *Zn*. Цифры после букв показывают среднее содержание меди и легирующих элементов в %. Например: ЛК 80–3 содержит 80% меди, 3% кремния, 17% цинка.

Простые и специальные латуни относятся к деформируемым сплавам и используются как конструкционный материал там, где требуются высокая прочность и коррозионная стойкость: в трубопроводной арматуре, в химическом машиностроении и особенно в судостроении.

Изготавливают из латуней листы, ленту, проволоку, а затем из этого проката – радиаторные трубки, снарядные гильзы, трубопроводы, шайбы, гайки, втулки, уплотнительные кольца, токопроводящие детали электрооборудования.

Кроме деформируемых латуней, применяются и литейные латуни, которые содержат большое количество добавок для улучшения литейных свойств. Их обозначение отличается от деформируемых латуней. В них содержание компонента указывается после буквы обозначения: ЛЦ40Мц3Ж – содержит 40% *Zn*, 3% *Mn*, 1% *Fe*, остальное медь.

Механические свойства литейных латуней существенно зависят от способа получения отливок – песчано-глинистые формы, керамические или кокиль. Из литейных латуней изготавливают паровые и воздушные клапаны, корпуса кранов, пробки топливной и воздушной аппаратуры.

Бронзы – это сплавы меди со всеми другими элементами: оловом, алюминием, кремнием, бериллием и др. Бронзы различают по химическому составу и состоянию обработки. В некоторых случаях прочность таким способом может быть повышена до 750 МПа , по сравнению с обычной прочностью двухкомпонентных бронз – $400 \div 500 \text{ МПа}$.

Бронзы называют по наличию легирующего элемента в её составе: *алюминиевые, оловянистые, кремнистые, бериллиевые* и т. д. Бронзы маркируют буквами «Бр» (*бронза*), за которыми следуют буквы и цифры, указывающие на состав и содержание в % легирующих элементов.

Например: Бр ОЦС 4–4–2,5 содержит 4% олова, 4% цинка, 2,5% свинца, остальное медь; Бр КМц 3–1 содержит 3% кремния, 1% марганца, остальное медь.

Оловянистые бронзы известны с бронзового века. Они, как и другие сплавы, делятся на деформируемые ($<10\% \text{ Sn}$) и литейные ($>10\% \text{ Sn}$). В прошлом бронзы получили название в зависимости от их назначения: *колокольная* ($20 \div 30\%$ олова), *зеркальная* ($30 \div 35\%$ олова), *монетная* ($4 \div 10\%$ олова), *пушечная* ($8 \div 18\%$ олова). Оловянистые бронзы отличаются хорошими литейными свойствами – высокой жидкотекучестью и малой усадкой. С целью экономии олова в бронзы добавляют цинк в таком количестве, чтобы он полностью растворился в меди, образуя твёрдый раствор, тем самым повышая механические свойства. Для улучшения обрабатываемости резанием в оловянистые бронзы добавляют свинец (например, БрО6Ц4С17: 6% *Sn*, 4% *Zn*, 17% *Pb*, остальное *Cu*). Литейные оловянистые бронзы, обладая высокой коррозионной стойкостью в воде и на воздухе, применяются для пароводяной арматуры.

Деформируемые оловянистые бронзы характеризуются более низким содержанием олова (например: Бр ОЦ4–3 содержит 4% *Sn*, 3% *Zn*, остальное *медь*) и имеют однофазную структуру твёрдого раствора. После холодной обработки давлением бронзы подвергаются отжигу при $600\div 700^{\circ}\text{C}$. Они пластичны и более прочны, чем литейные. Кроме того, деформируемые оловянистые бронзы обладают высокими упругими свойствами, поэтому их используют для получения пружин, мембран и др.

Алюминиевые бронзы обычно содержат от 5 до 10% алюминия. Механические и коррозионные свойства этих бронз выше, чем у оловянистых. Алюминиевые бронзы можно подвергать закалке и старению. Однофазные алюминиевые бронзы (Бр А7) более пластичны, чем двухфазные, и относятся к деформируемым. Они обладают высокой прочностью и пластичностью ($\sigma_B = 400\div 450 \text{ МПа}$, $\delta = 60\%$).

Легируют алюминиевые бронзы железом, никелем, марганцем и др. для устранения литейных недостатков и увеличения механических свойств после упрочняющей термической обработки (закалки с последующим старением). Например, у бронзы Бр АЖН10–4–4 (10% *Al*, 4% *Fe*, 4% *Ni*, остальное *медь*) твёрдость увеличивается от 1500 до 4000 *НВ*; из неё изготавливают седла клапанов, направляющие втулки, шестерни и др.

Кремнистые бронзы содержат до 3% кремния и являются заменителями оловянистых бронз, для улучшения механических свойств их дополнительно легируют никелем и марганцем. Обладая высокой упругостью и антикоррозионными свойствами, эти бронзы применяются для изготовления упругих элементов различных механизмов. Из бронзы Бр КМц3–1 (3% *Si*, 1% *Mn*, остальное *медь*) изготавливают стопорные и упорные кольца насосов, мембраны датчиков давления.

Свинцовые бронзы обладают высокими антифрикционными свойствами, хорошей теплопроводностью (например, Бр С30), поэтому из этих бронз изготавливают вкладыши подшипников, работающих при больших давлениях и скоростях.

Бериллиевые бронзы содержат не более 2,5% бериллия (например, Бр Б2: 2% *Be*, *остальное медь*). Бериллий образует с медью твёрдый раствор переменной растворимости и, следовательно, такие бронзы можно подвергать упрочняющей термической обработке (закалке от 780°C с последующим старением от 320°C). После термической обработки повышаются как прочностные, так и упругие свойства: $\sigma_B = 1500 \text{ МПа}$, $\tau_{\text{упр}} = 600 \div 740 \text{ МПа}$. Бериллиевую бронзу применяют в виде пружин в часовых механизмах, электроаппаратуре, в качестве упругих контактов.

V.3.3. *Алюминий и его сплавы*

Алюминий – металл серебристо-белого цвета, имеет кристаллическую ГЦК решетку, температура плавления 660°C, удельный вес 2,7 г/см³.

Обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, коррозионно-стойк за счет образования на поверхности защитной оксидной плёнки.

Имеет малую прочность ($\sigma_B = 60 \div 80 \text{ МПа}$) и твёрдость (250 НВ), пластичен ($\delta = 35 \div 50\%$). При пластической деформации значительно наклёпывается ($\sigma_B = 150 \div 180 \text{ МПа}$, $\delta = 1,5\%$, 450 НВ) [17,18,19].

Технический алюминий выпускается в виде деформируемого полуфабриката (листы, профили, прутки и др.).

Механические свойства алюминия зависят от его чистоты и состояния. Увеличение содержания примесей и пластическая деформация повышают прочность и твёрдость алюминия (табл. V.4). Ввиду низкой прочности применяют для ненагруженных деталей и элементов конструкций, когда от материала требуется лёгкость, свариваемость, пластичность. Изготавливают рамы, трубопроводы, фольгу, цистерны для перевозки нефти и нефтепродуктов, посуду и др.

Свойство высокой теплопроводности используют для изготовления теплообменников в промышленных и бытовых холодильных установках.

Таблица V.5

Механические свойства алюминия

Марка	Сумма примесей, %	Состояние	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ, МПа
A995	0,005	Литье		—		
A5	0,5		—			
A0			—			
Деформированное и отожженное						
Деформированное						

Алюминий имеет высокую отражательную способность. Это позволяет использовать его в прожекторах, рефлекторах, экранах телевизоров. Он обладает высокой коррозионной стойкостью к морской воде, органическим кислотам, устойчив в нейтральных растворах солей магния, натрия. Химическая стойкость алюминия различной чистоты обуславливается образованием на его поверхности тончайшей, но плотной беспористой плёнки окиси алюминия Al_2O_3 . В машиностроении чистый алюминий практически не используется. Основное применение алюминия – это производство сплавов, достоинство которых в их малом удельном весе.

Алюминиевые сплавы классифицируют по технологии изготовления, способности к упрочнению термической обработкой и свойствам (рис. V.13).

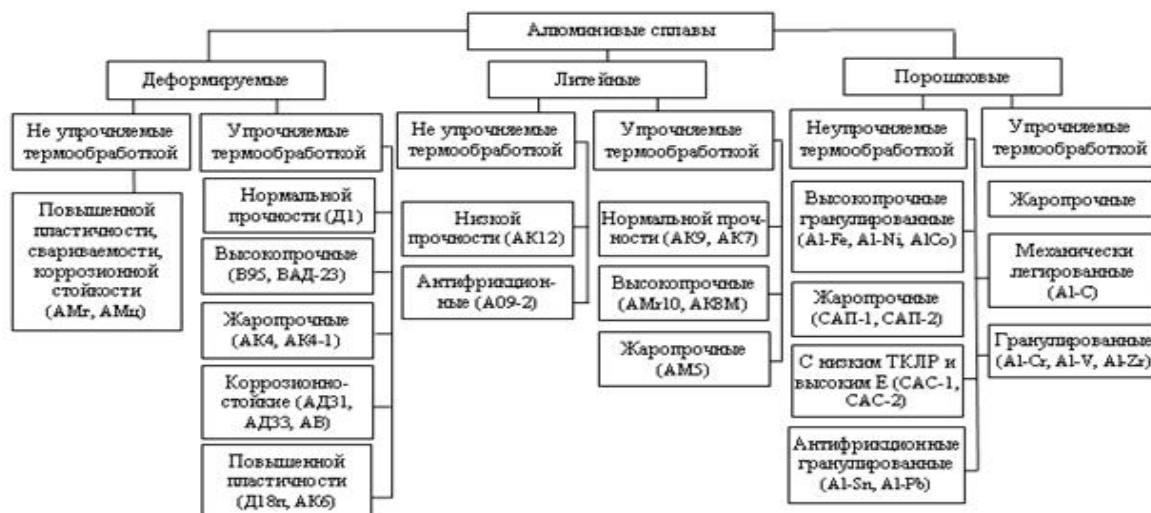


Рис. V.13. Классификация алюминиевых сплавов

Технические алюминиевые сплавы подразделяют на две группы: применяемые в деформированном виде (прессованном, катаном, кованном) и в литом (*деформированные и литейные сплавы*).

Свойство высокой электрической проводимости используют при изготовлении конденсаторов, проводов, кабелей, шин и т. п.

Границу между сплавами этих групп определяет предел насыщения твёрдого раствора при эвтектической температуре (*рис. V.14*).

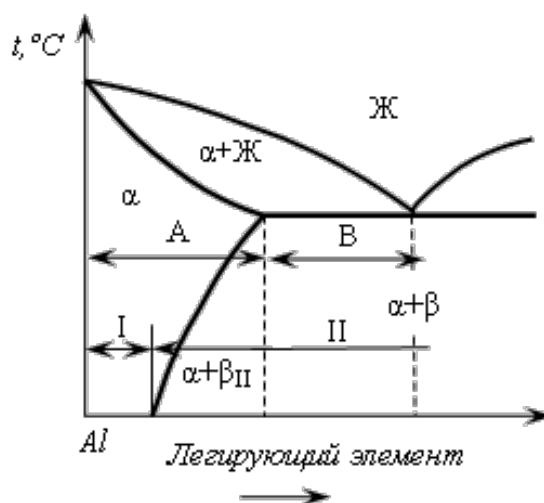


Рис. V. 14. Диаграмма состояния «Алюминий – легирующий элемент»

Деформируемые и литейные алюминиевые сплавы подразделяются на *не упрочняемые* и *упрочняемые* в результате термической обработки.

Основными легирующими элементами алюминиевых сплавов являются *медь, магний, кремний, марганец, цинк, реже литий, никель, титан*.

Легирующие элементы повышают температуру рекристаллизации алюминия. Многие легирующие элементы образуют с алюминием твёрдые растворы ограниченной переменной растворимости и промежуточные фазы $CuAl_2$, Mg_2Si и др.

Это даёт возможность подвергать сплавы упрочняющей термической обработке, состоящей из закалки на пересыщенный твёрдый раствор и естественного или искусственного старения.

К деформируемым сплавам *неупрочняемым* термической обработкой относятся сплавы АМн и АМг.

Сплавы типа АМц (АМц1) относятся к системе «Al – Mn»; структура состоит из α -твёрдого раствора и вторичных выделений фазы $MnAl_6$, переходящих в твёрдый раствор при повышении температуры. При легировании железом вместо $MnAl_6$ образуется сложная тройная фаза $(Mn, Fe)Al_6$, которая не растворяется в алюминии, поэтому эти сплавы не упрочняются термической обработкой. В отожженном состоянии обладают высокой пластичностью ($\delta = 18 \div 22\%$) и низкой прочностью ($\sigma_B = 130 \text{ МПа}$).

Сплавы типа АМг (АМг1, АМг5) относятся к системе «Al–Mg». Магний образует с алюминием α -твёрдый раствор, концентрация которого при повышении температуры увеличивается от 1,4 до 17,4% в результате растворения фазы Mg_2Al_3 . Сплав АМг в отожженном состоянии имеет $\sigma_B = 190 \text{ МПа}$, $\delta = 23\%$.

Сплавы типа АМц и АМг упрочняют с помощью пластической деформации и используют в нагартованном (80% *наклёпа*) и полунагартованном (40% *наклёпа*) состояниях. Применение *наклёпа* ограничено из-за резкого снижения пластичности, поэтому в большинстве случаев их используют в отожженном состоянии. Температура отжига: $350 \div 420^\circ\text{C}$.

Сплавы типа АМц и АМг применяют для изделий, получаемых глубокой вытяжкой или сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для бензина и масла, сварные баки и т. п.).

К *деформируемым* сплавам, *упрочняемым* термической обработкой, относятся сплавы системы «Al–Cu». Они характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности. Наиболее характерными представителями этих сплавов являются дуралюмины, широко применяемые в авиа-, судо- и ракетостроении. Согласно диаграмме «Al–Cu» (рис. V.15), медь с алюминием образуют твёрдый раствор, максимальная концентрация меди в котором 5,65% при эвтектической температуре. С понижением температуры растворимость меди уменьшается, достигая 0,1% при 20°C . Из

твёрдого раствора выделяется θ -фаза – CuAl_2 , содержащая 54,1% Cu . Она имеет объёмноцентрированную тетрагональную кристаллическую решетку и обладает сравнительно высокой твёрдостью.

В сплавах дополнительно легированных магнием образуется ещё ζ -фаза (Al_2CuMg) с ромбической кристаллической решеткой.

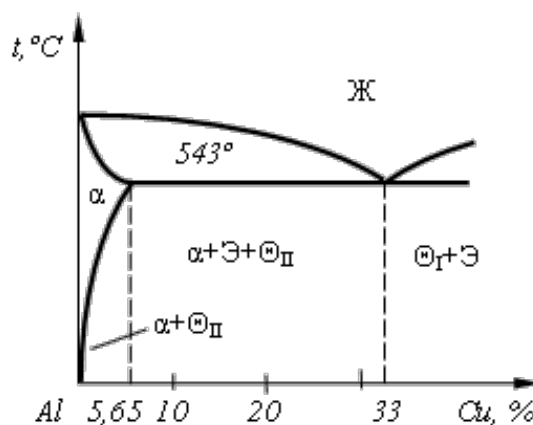


Рис. V.15. Диаграмма состояния «Al – Cu»

Маркируются дуралюмины буквой «Д» и цифрой, означающей номер сплава, например: Д1, Д16, Д20 и т.д. Поставляются в виде сортового проката в отожженном и термически упрочненном состоянии. Упрочняющая термическая обработка состоит из закалки и естественного старения.

При закалке дуралюмины охлаждают в воде при 40°C . После закалки структура состоит из пересыщенного раствора и нерастворимых фаз, образуемых примесями.

При естественном старении образуются зоны Гинье-Престона, богатые медью и магнием. Зоны Гинье-Престона – это скопление атомов меди, неразрывно связанных с α -твёрдым раствором. Они значительно тормозят перемещение дислокаций, что и является причиной возрастания прочности при старении. Старение продолжается пять-семь суток. Длительность старения значительно сокращается при увеличении температуры до 40°C и особенно до 100°C . После закалки и искусственного старения сплавы обладают лучшей пластичностью и менее чувствительны к концентраторам напряжений. Искусственному старению (при 190°C , в течение 10 часов)

подвергаются детали, используемые для работы при повышенных температурах (до 200°C).

Кроме дуралюминов к термически упрочняемым деформируемым сплавам относятся следующие алюминиевые сплавы: *ковочные* (АК4-1, АК6, АК8 и т.д.), маркируемые буквами АК, и высокопрочные (В95, В96 и т.д.), маркируемые буквой В.

По химическому составу ковочные сплавы близки к дуралюминам, отличаясь от них более высоким содержанием кремния. Детали из ковочных сплавов подвергают закалке от $500\div 575^{\circ}\text{C}$ и старению при $150\div 165^{\circ}\text{C}$ в течение $6\div 15$ часов. Дополнительное легирование *Ni*, *Fe*, *Ti* повышает температуру рекристаллизации и жаропрочность этих сплавов до 300°C , что позволяет использовать их при изготовлении поршней, лопаток, дисков осевых компрессоров турбореактивных двигателей и т. п.

Высокопрочные алюминиевые сплавы принадлежат к системе «Al–Zn–Mg–Cu» и содержат добавки *марганца*, *хрома*, *циркония*. Эти элементы увеличивают неустойчивость твердого расплава, ускоряют его распад и усиливают старение сплава. Наибольшее упрочнение вызывают закалка с температур $465\div 475^{\circ}\text{C}$ и старение при 140°C , в течение 16 часов. После такой обработки сплав В95 имеет $\sigma_B = 569\div 600 \text{ МПа}$, $\delta = 9\div 12\%$, 1500 НВ. Сплавы применяют для высоконагруженных деталей, конструкций, работающих в условиях напряжения сжатия.

Основные требования к *литейным алюминиевым сплавам* – сочетание хороших литейных свойств (высокой жидкотекучести, небольшой усадки, малой склонности к образованию горячих трещин и пористости) с оптимальными механическими и химическими (сопротивление коррозии) свойствами. К литейным относятся сплавы эвтектического состава на основе систем «Al–Si», «Al–Cu», «Al–Mg».

Лучшими литейными свойствами обладают эвтектические сплавы на основе «Al–Si» (*силумины*) (рис. V. 16), например: АЛ2, АЛ4, АЛ9.

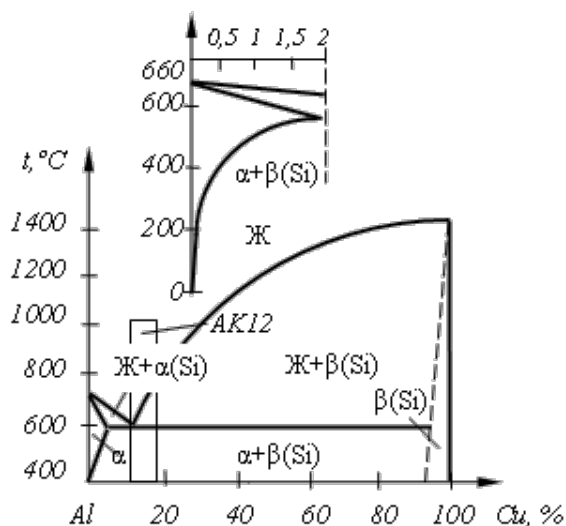


Рис. V.16. Диаграмма состояния системы «Al–Si».

Наиболее распространён сплав, содержащий $10\div13\%$ Si (АЛ2), обладающий высокой коррозионной стойкостью, большой плотностью отливок. В структуре содержит эвтектику, состоящую из α -твёрдого раствора кремния в алюминии и кристаллов практически чистого кремния. Кремний при затвердевании эвтектики выделяется в виде грубых кристаллов игольчатой формы, которые играют роль внутренних надрезов в пластичном α -твёрдом растворе. Такая структура обладает низкими механическими свойствами.

Силумины обычно модифицируют натрием, который в виде хлористых и фтористых солей вводят в жидкий сплав в количестве $2\div3\%$ от массы сплава. В этом случае в структуре сплава вместо избыточного кремния появляются кристаллы α -твёрдого раствора. Это приводит к увеличению пластичности и прочности.

Для легирования силуминов используют магний, медь, марганец, титан. Растворяясь в алюминии, они повышают прочность, твёрдость. Медь улучшает обрабатываемость резанием, титан оказывает модифицирующее действие. Медь и магний, обладая переменной растворимостью в алюминии, способствует упрочнению силуминов при термической обработке, состоящей из закалки и искусственного старения. Температура закалки различных

силуминов находится в пределах $515\div 535^{\circ}\text{C}$, температура старения – $150\div 180^{\circ}\text{C}$.

Из легированных силуминов наибольшее применение имеют сплавы с добавками магния АК7ч, (ч – содержание примесей $0,1\div 0,3\%$), магния и марганца (АК9ч). Наибольшее упрочнение вызывает метастабильная β -фаза (Mg_2Si). Легированные силумины применяют для средних и крупных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессора, картеров, головок цилиндров.

Сплавы системы «Al–Cu» характеризуются высокой прочностью при обычных и повышенных температурах, хорошо обрабатываются резанием и свариваются, но (из-за отсутствия эвтектики) обладают плохими литейными свойствами. Сплавы склонны к хрупкому разрушению вследствие выделения по границам зерен грубых частиц θ -фазы: CuAl_2 и $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, поэтому их применяют в закалённом состоянии, когда эти соединения переведены в твёрдый раствор. Во время нагрева сплава под закалку наряду с растворением θ -фазы из твёрдого раствора выпадают мелкодисперсные частицы фазы $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$, увеличивающие прочность при обычных и повышенных температурах. После закалки: $\sigma_B = 320 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 180 \text{ МПа}$, 800 НВ .

Сплавы системы «Al–Cu» используют для деталей, работающих при температурах до 300°C . Так как эти сплавы малоустойчивы против коррозии, то отливки подвергают анодированию, химическому оксидированию и окраске.

Сплавы системы «Al–Mg» обладают высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, обрабатываются резанием и свариваются. Дополнительное легирование *бериллием, титаном и цирконием* вызывает измельчение зерна и затормаживание процесса естественного старения, приводящего к снижению пластичности и коррозионной стойкости. Термообработка состоит из закалки с охлаждением в масле ($40\div 50^{\circ}\text{C}$). Выдержка при температуре закалки составляет $12\div 20$ часов, что

обеспечивает растворение частиц Al_3Mg_2 в α -твёрдом растворе и получение однородного раствора. Добавление до 1,5% Si улучшает литейные свойства.

Сплавы системы «Al–Mg» применяют для изготовления деталей, работающих в условиях высокой влажности, в судо-, самолето- и ракетостроении.

§ V.4. Неметаллические материалы

V.4.1. Полимеры и пластмассы

Полимеры (от греческого *polymeres* – состоящий из многих частей, многообразный, от *poly* – много и *meros* – доля, часть) – соединения с высокой молекулярной массой, молекулы которых состоят из большого числа регулярно или нерегулярно повторяющихся групп атомов – звеньев.

Молекулы, состоящие из многочисленных элементарных звеньев (мономеров) одинакового химического состава и структуры, называются *макромолекулами*. Свойства вещества определяются не только химическим составом этих макромолекул, но и их взаимным расположением и строением. Поперечное сечение макромолекулы составляет, как правило, несколько нанометров, а длина достигает нескольких тысяч нанометров или нескольких микрометров, поэтому макромолекулы обладают хорошей гибкостью.

По форме макромолекул полимеры делят на линейные (цеповидные), разветвленные, плоские, ленточные (лестничные), пространственные или сетчатые (рис. V.17).

Полимеры с линейной структурой эластичны, при нагревании размягчаются, растворимы в органических растворителях. Полимеры с сетчатой структурой обладают наибольшей прочностью и теплостойкостью.

По фазовому состоянию полимеры подразделяют на аморфные и кристаллические [20]. Аморфные полимеры однофазны и построены из цепных молекул, собранных в пачки (рис. V.18).

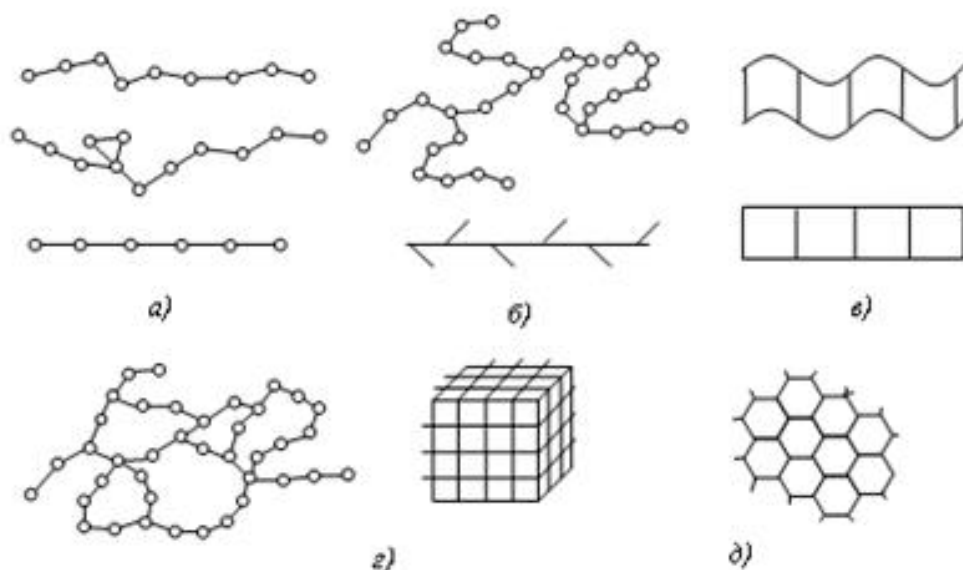


Рис. V.17. Форма макромолекулы полимеров:

а – линейная; б – разветвленная; в – ленточная; г – пространственная, сетчатая, д – паркетная

Пачка состоит из многих рядов макро молекул, расположенных последовательно друг за другом. Пачки способны перемещаться относительно соседних элементов, так как они являются структурными элементами.

В случае образования кристаллической структуры атомы соседних цепей расположены в правильном трехмерном порядке, образуя определенную пространственную решетку. Кристаллические участки полимера чередуются с аморфными, поэтому степень кристалличности в полимерах никогда не достигает 100%, в отличие от металлов. Кристалличность сообщает полимеру большую жесткость и твердость, а также теплостойкость. При длительном хранении, эксплуатации и переработке надмолекулярные структуры могут претерпевать изменения.

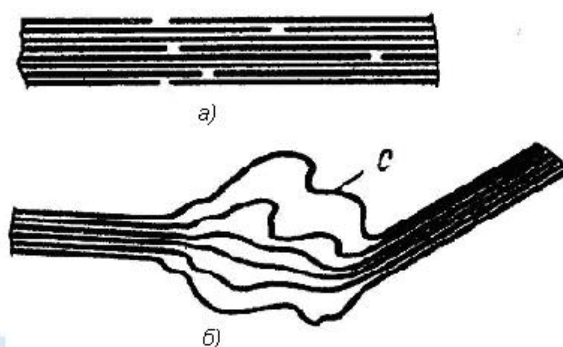


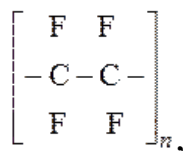
Рис. V.18. Схематичное строение пачки:

а – объединение макромолекул в пачки; б – пачка с аморфным участком

По полярности полимеры подразделяют на *полярные* и *неполярные*. Полярность определяется наличием в их составе диполей – разобщенных центров распределения положительных и отрицательных зарядов.

Неполярные полимеры

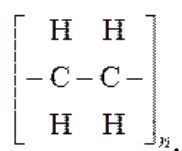
Например: *Политетрафторэтилен*, или *фторопласт-4* $(-C_2F_4-)_n$:



также известный как *тефлон* - полимер тетрафторэтилена (ПТФЭ), пластмасса, является высококачественным диэлектриком, обладающим редкими физическими и химическими свойствами. Широко применяется в технике и в быту.

Слово «Тефлон» является зарегистрированным товарным знаком корпорации *DuPont*. Непатентованное название вещества - «политетрафторэтилен» или «фторополимер». В России традиционное техническое название этого материала - фторопласт-4.

Полиэтилен:



также является высококачественным диэлектриком, обладает хорошей морозостойкостью, но имеет небольшую прочность ($\sigma_B = 20 \div 45$ МПа).

Полярные полимеры

У *полярных* линейных полимеров из-за асимметрии строения молекул сильно выражена дипольно-релаксационная поляризация. Поэтому они обладают пониженными электроизоляционными свойствами по сравнению с неполярными полимерами, особенно на высоких частотах.

Наиболее распространёнными материалами этой группы являются *поливинилхлорид*, *полиэтилентерефталат* (лавсан), *полиметилметакрилат* (органическое стекло) и *полиамиды*.

Изоляционные свойства *полярных* линейных полимеров можно охарактеризовать следующими усредненными параметрами:

- диэлектрическая проницаемость - от 3 до 6;
- удельное объёмное сопротивление от 10^{11} до 10^{14} Ом·м;
- электрическая прочность - от 15 до 50 МВ/м.

Поливинилхлорид (ПВХ) - твёрдый продукт полимеризации газа винилхлорида $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$, представляющего собой этилен, в молекуле которого один атом водорода замещен атомом хлора. Благодаря сильным межмолекулярным взаимодействиям ПВХ является материалом жестким и негибким. Для придания эластичности к ПВХ добавляют пластификаторы - органические полярные жидкости с высокой точкой кипения. Введение полярного пластификатора ухудшает электрические свойства полимера.

Полиэтилентерефталат (лавсан) - это термопластичный полимер, полученный из этиленгликоля и терефталевой кислоты. Он обладает значительной механической прочностью и достаточно высокой температурой размягчения. Этот полярный диэлектрик применяют в виде волокон и плёнок.

Полиметилметакрилат (органическое стекло, плексиглас) при действии электрической дуги выделяет газы, помогающие её гашению.

Полиамиды отличаются особой прочностью и эластичностью. Особенно известен капрон, применяемый в виде волокон, тканей и литых изделий.

Поликарбонаты - особо прочные, твёрдые и прозрачные - применяют как основу лазерных и винчестерных дисков.

Полярные полимеры, по сравнению с *неполярными*, характеризуются примерно на два порядка большими потерями и проводимостью. Поэтому они используются как изоляционные и конструкционные материалы в электротехнике. На повышенных и высоких частотах (например, в технике связи) их применение ограничено из-за повышенного затухания электрических сигналов.

Поливинилхлоридный пластикат получил широкое применение в производстве монтажных проводов и силовых кабелей благодаря гибкости, достаточной прочности и высокой производительности наложения изоляции. Плёнки из лавсана используют в качестве несущей основы при изготовлении ленты и дискет для магнитной записи, а также для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов и дросселей, рассчитанных на рабочую температуру до 150°C . Конденсаторы из таких плёнок, по сравнению с бумажными, обладают большей рабочей температурой и меньшими размерами.

Органическое стекло в основном применяется как декоративный материал в электро- и радиоаппаратуре.

Капрон, благодаря хорошим термопластичным свойствам и высокой механической прочности, используют в производстве различных конструктивных деталей радиоаппаратуры (корпусы приборов, ручки и кнопки управления, клавиши переключения диапазонов, каркасы индуктивных катушек и т. п.).

На основе *полиамидов* изготавливают эмальлаки, образующие прочные эластичные диэлектрические покрытия на металлических проводах.

Полимерные плёнки из-за упорядоченного расположения молекул обладают особо хорошими механическими и электрическими свойствами. Плёнки используют как основу магнитных носителей информации, а также для изоляции конденсаторов, обмоток высоковольтных машин, жил кабелей сверхвысокого напряжения и высокочастотных кабелей связи. Многие плёнки чувствительны к надрыву, поэтому наклеиваются на бумажные подложки.

V.4.2. Резиновые и клеящие материалы [21÷24]

Резиной (от латинского *resina* – смола) называется продукт специальной обработки (вулканизации) смеси каучука и серы с различными

добавками (наполнители, пластификаторы, активаторы вулканизации, антиоксиданты и др.).

Резина как технический материал отличается от других материалов высокими эластическими свойствами, которые присущи каучуку. Она способна к очень большим деформациям (относительное удлинение достигает 1000 %), которые почти полностью обратимы.

Кроме отмеченных особенностей, для резиновых материалов характерны высокая стойкость к истиранию, газо- и водонепроницаемость, химическая стойкость, электроизолирующие свойства и небольшая плотность.

Основой всякой *резины* служит натуральный каучук (НК) или синтетический (СК), который и определяет основные свойства резинового материала. Для улучшения физико-механических свойств каучуков вводятся различные добавки (ингредиенты).

Механические свойства *резины* (прочность при растяжении, напряжение при заданном относительном удлинении, твердость, износостойкость, усталостная выносливость и др.) в значительной степени зависят от состава резиновой смеси.

Резину подразделяют на две группы:

- *резины* общего назначения, применяемые в производстве шин, конвейерных лент, ремней, рукавов, изделий бытового назначения;
- *резины* специального назначения, используемые для получения разнообразных изделий, которые должны обладать одним или несколькими специальными свойствами (маслобензостойкость, морозостойкость, износостойкость и др.)

Резиновые клеи – это растворы каучуков или резиновых смесей в органических растворителях. В зависимости от типа каучука, на основе которого готовят клей, различают резиновые клеи специального и общего назначения. По температуре вулканизации (отверждения) резиновые клеи делят на клеи горячего (больше 100°C) и холодного отверждения.

Резиновые клеи применяют при сборке резиновых и резинотканевых изделий, в производстве резиновых тканей и т. д.

Герметики, герметизирующие составы – полимерные композиции, применяемые для обеспечения непроницаемости болтовых или заклепочных соединений металлических конструкций, стыков между панелями наружных стен зданий и т. д. *Герметики* широко применяют в авиации, автомобилестроении, судостроении, строительстве. Они используются также в областях, не связанных с их основным назначением, например для изготовления точных слепков и отливок в технике зубопротезирования и криминалистике.

V.4.3. Стекло, ситаллы, графит [25,26,27,28]

Стекло неорганическое – прозрачный (бесцветный или окрашенный) хрупкий материал, получаемый при остывании расплава, содержащего стеклообразующие компоненты (оксиды кремния, бора, алюминия, фосфора, титана, циркония и др.) и оксиды металлов (лития, калия, свинца, кальция, магния и др.). По типу стеклообразующего компонента различают стекло неорганическое силикатное (на основе SiO_2), боратное (B_2O_3), боросиликатное, алюмосиликатное и др. (рис. V.19).

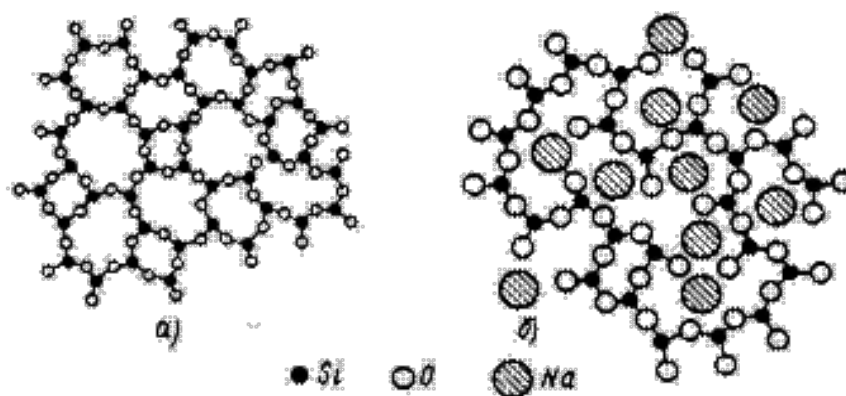


Рис. V.19. Схема непрерывной структурной сетки стекла:
а – кварцевого, б – натриево-силикатного

Благодаря возможности придавать неорганическому стеклу разнообразные свойства, оно широко распространено в различных отраслях техники, строительстве, декоративном искусстве и быту.

Стекло органическое – техническое название прозрачных пластмасс на основе полистирола, поливинилхлоридов, поликарбонатов и др. По сравнению с неорганическим стеклом органическое отличается относительно небольшой плотностью и повышенной прочностью. Органическое стекло малочувствительно к ударам, толчкам и не дает опасных осколков. Применяется для изготовления трехслойного стекла для остекления самолетов, автомобилей и др. Из него изготавливают детали приборов, линзы, светофильтры и бытовые изделия.

Термин «*ситаллы*» образован от слов: стекло и кристаллы. За рубежом их называют стеклокерамикой, пирокерамами. *Ситаллы* получают на основе неорганических стекол путем их полной или частичной управляемой кристаллизации. По структуре и технологии получения *ситаллы* занимают промежуточное положение между обычным стеклом и керамикой. От неорганических стекол они отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов – более мелкозернистой и однородной микрокристаллической структурой (рис. V.20).



Рис. V.20. Схема кристаллизации стекла при образовании *ситаллов* с помощью катализаторов

Ситаллы получают путем плавления стекольной шихты специального состава с добавкой катализаторов, охлаждения расплава до пластичного состояния и формования из него изделий методами стекольной технологии и последующей кристаллизации. *Ситалловые* изделия получают также порошковым методом спекания.

В отличие от обычного стекла, свойства которого определяются в основном его химическим составом, для *ситаллов* решающее значение имеют структура и фазовый состав. Причина ценных свойств *ситаллов* заключается в их исключительной мелкозернистости, почти идеальной

поликристаллической структуре. В них совершенно отсутствует всякая пористость и усадка материала при его переработке незначительна. Свойства *ситаллов* изотропны. Большая абразивная стойкость делает их малочувствительными к поверхностным дефектам. Материалы обладают высокой химической устойчивостью к кислотам и щелочам, высокой жаростойкостью, газонепроницаемостью и нулевым водопоглощением, являются хорошими диэлектриками.

Жаропрочность *ситаллов* под нагрузкой составляет $800 \div 1200^\circ\text{C}$. Ударная вязкость *ситаллов* выше, чем ударная вязкость стекла ($4,5 \div 10,5 \text{ кДж/м}^2$), однако они являются хрупкими материалами. Обладают высокой твердостью (микротвердость $7000 \div 10500 \text{ МПа}$) и износостойкостью.

Применение *ситаллов* определяется их свойствами. Из *ситаллов* изготавливают подшипники, детали для двигателей внутреннего сгорания, трубы для химической промышленности, оболочки вакуумных электронных приборов, детали радиоэлектроники. *Ситаллы* используют в качестве жаростойких покрытий.

Графит – минерал, наиболее устойчивая кристаллическая модификация чистого углерода. Это полимерный материал кристаллического пластинчатого строения, образованный параллельными слоями гексагональных сеток (плоскостей) (рис. V.21).

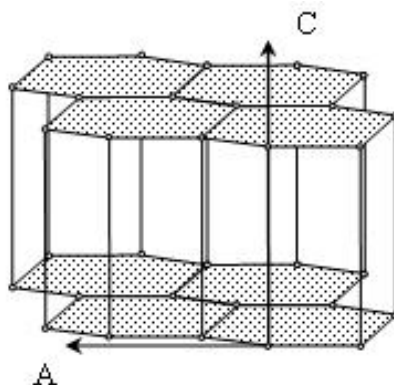


Рис. V.21. Кристаллическая решетка графита

Графит встречается в природе, а также его получают искусственным путем. Физико-механические свойства искусственного *графита* зависят от

природы исходного сырья, технологии получения, плотности, степени ориентации кристаллов и др.

В качестве исходных материалов для производства технического *графита* применяют твердое сырье – нефтяной кокс и каменноугольный пек в качестве связующего вещества. Заготовки формуруются в процессе прессования или выдавливания. Процесс графитизации осуществляется путем нагрева заготовок (обоженных при 1200 °С) до 3000 °С.

Использование *графита* основано на ряде его уникальных свойств:

- для изготовления плавильных тиглей, футеровочных плит – применение основано на высокой температурной стойкости графита (в отсутствие кислорода), на его химической стойкости к целому ряду расплавленных металлов;
- электродов, нагревательных элементов – благодаря высокой электропроводности и химической стойкости к практически любым агрессивным водным растворам (намного выше, чем у благородных металлов).

Для получения химически активных металлов методом электролиза расплавленных соединений. В частности, при получении алюминия используются сразу два свойства *графита*: хорошая электропроводность, и как следствие – его пригодность для изготовления электрода и газообразность продукта реакции, протекающей на электроде – углекислого газа. Газообразность продукта означает, что он выходит из электролизера сам, и не требует специальных мер по его удалению из зоны реакции. Это свойство существенно упрощает технологию производства алюминия.

Твёрдых смазочных материалов, в комбинированных жидких и пастообразных смазках:

- наполнитель пластмасс;
- компонент состава для изготовления стержней для чёрных графитовых карандашей (в смеси с каолином);
- для получения синтетических алмазов;

- для изготовления контактных щёток в электродвигателях, динамомашин и прочих устройствах, где требуется надёжный подвижный контакт.

V.4.4. Композиционные материалы [29-34]

Композиционными материалами, или композитами, называют материалы, состоящие из сильно различающихся по свойствам друг от друга, взаимно нерастворимых компонентов.

Сравнительно пластичный компонент, непрерывный во всем объеме композиционного материала, называется *матрицей*. Более прочный и твердый компонент, прерывистый и разъединенный в объеме композита, называется *арматурой*.

Матрица связывает композицию и придает ей нужную форму. В зависимости от материала матрицы различают композиционные материалы с *металлической матрицей* или *металлические композиционные материалы* (МКМ) и с *неметаллической матрицей*: с полимерной – полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической – керамические композиционные материалы (ККМ).

По типу упрочняющих наполнителей композиционные материалы подразделяют на *дисперсно-упрочненные*, *армированные (волокнистые)* и *слоистые* (рис. V.22).

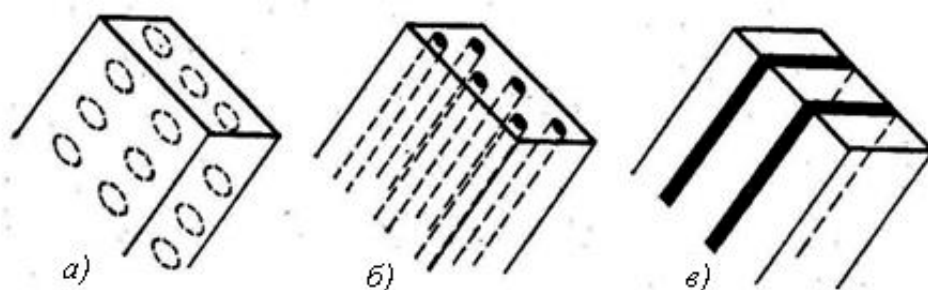


Рис. V.22. Схема строения композиционных материалов:
а – дисперсно-упрочненные; б – волокнистые; в – слоистые

В дисперсно-упрочненные композиционные материалы искусственно вводят мельчайшие равномерно распределенные тугоплавкие частицы

карбидов, оксидов, нитридов и другие, не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояния между ними, тем прочнее композиционный материал. В дисперсно-упрочненных композиционных материалах матрица является основным несущим элементом.

Арматурой в армированных композиционных материалах могут быть волокна различной формы (нити, ленты, сетки разного плетения). Прочность таких композиционных материалов определяется прочностью армирующих волокон, которые воспринимают основную нагрузку. Армирование дает большой прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо.

Слоистые композиционные материалы набираются из чередующихся слоев волокон и листов матричного материала (типа «сэндвич»). Слои волокон в таком композиционном материале могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев матрицы из сплавов с различными механическими свойствами.

Из освоенных промышленностью композиционных материалов ведущее место занимают металлические композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов. Использование алюминия в качестве матричного материала обусловлено широким распространением его в технике, низкой плотностью, коррозионной стойкостью, возможностью регулировать механические свойства алюминиевых сплавов термической обработкой и подвергать их различным видам обработки давлением и литья.

1. Композиционные материалы с металлической матрицей

К этому виду композиционных материалов относятся материалы типа САП (*спеченная алюминиевая пудра*), которые представляют собой алюминий, упрочненный дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1 мкм в

присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче и в ней повышается содержание оксида алюминия. Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или выдавливание спеченной алюминиевой заготовки в форме готовых изделий, которые можно подвергать дополнительной термической обработке.

Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до 300–500 °С. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

Армирование короткими волокнами проводят методами порошковой металлургии, состоящими из прессования с последующей гидроэкструзией или прокаткой заготовок. При армировании непрерывными волокнами композиций типа сэндвич, состоящих из чередующихся слоев алюминиевой фольги и волокон, применяют прокатку, горячее прессование, сварку взрывом, диффузионную сварку.

Весьма перспективным материалом является композиция *«Алюминий–бериллиевая проволока»*, в которой реализуются высокие физико-механические свойства бериллиевой арматуры, и в первую очередь, ее низкая плотность и высокая удельная жесткость. Получают композиции с бериллиевой проволокой диффузионной сваркой пакетов из чередующихся слоев бериллиевой проволоки и матричных листов. Из алюминиевых сплавов, армированных стальной и бериллиевой проволоками, изготавливают корпусные детали ракет и топливные баки.

В композиции *«Алюминий–углеродные волокна»* сочетание низкой плотности арматуры и матрицы позволяет создать композиционные материалы с высокой удельной прочностью и жесткостью. Недостатком углеродных волокон является их хрупкость и высокая реакционная

способность. Композицию «Алюминий–углерод» получают пропиткой углеродных волокон жидким металлом или методами порошковой металлургии. Технологически наиболее просто осуществимо протягивание пучков углеродных волокон через расплав алюминия.

Композит «Алюминий – углерод» применяют в конструкциях топливных баков современных истребителей. Благодаря высокой удельной прочности и жесткости материала масса топливных баков уменьшается на 30 %. Этот материал используют также для изготовления лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей.

2. Композиционные материалы с неметаллической матрицей

Композиционные материалы с неметаллической матрицей нашли широкое применение в промышленности. В качестве неметаллических матриц используют полимерные, углеродные и керамические материалы. Из полимерных матриц наибольшее распространение получили эпоксидная, фенолоформальдегидная, полиамидная. Угольные матрицы коксованные или получают из синтетических полимеров, подвергнутых пиролизу (разложение, распад). Матрица связывает композицию, придавая ей форму. Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др.), а также металлические (проволоки), обладающие высокой прочностью и жесткостью.

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними.

Содержание упрочнителя в ориентированных материалах составляет 60–80 об. %, в неориентированных (с дискретными волокнами и нитевидными кристаллами) – 20–30 об. %. Чем выше прочность и модуль упругости волокон, тем выше прочность и жесткость композиционного

материала. Свойства матрицы определяют прочность композиции при сдвиге и сжатии и сопротивление усталостному разрушению.

По виду упрочнителя композиционные материалы классифицируют на *стекловолокниты*, *карбоволокниты* с углеродными волокнами, *бороволокниты* и *органоволокниты*.

В слоистых материалах волокна, нити, ленты, пропитанные связующим компонентом, укладываются параллельно друг другу в плоскости укладки. Плоскостные слои собираются в пластины. Свойства получаются анизотропными. Для работы материала в изделии важно учитывать направление действующих нагрузок. Можно создавать материалы как с изотропными, так и с анизотропными свойствами. Можно укладывать волокна под разными углами, варьируя свойства композиционных материалов. От порядка укладки слоев по толщине пакета зависят изгибные и крутильные жесткости материала.

Применяется укладка упрочнителей из трех, четырех и более нитей. Наибольшее применение имеет структура из трех взаимно перпендикулярных нитей. Упрочнители могут располагаться в осевом, радиальном и окружном направлениях.

Трехмерные материалы могут быть любой толщины в виде блоков, цилиндров. Объемные ткани увеличивают прочность на отрыв и сопротивление сдвигу по сравнению со слоистыми. Система из четырех нитей строится путем расположения упрочнителя по диагоналям куба. Структура из четырех нитей равновесна, имеет повышенную жесткость при сдвиге в главных плоскостях. Однако создание четырех направленных материалов сложнее, чем трех направленных.

Наиболее эффективными с точки зрения использования в самых жестких условиях сухого трения являются антифрикционные материалы на основе *политетрафторэтилена* (ПТФЭ).

Для ПТФЭ характерен достаточно высокий статический коэффициент трения, однако в процессе трения скольжения на поверхности ПТФЭ

образуется очень тонкий слой высокоориентированного полимера, способствующий выравниванию статического и динамического коэффициентов трения и плавному движению при скольжении. При изменении направления скольжения наличие ориентированной поверхностной пленки вызывает временное увеличение коэффициента трения, значение которого снова уменьшается по мере переориентации поверхностного слоя. Такое поведение ПТФЭ при трении обусловило его широкое применение в промышленности, где главным образом используют ненаполненный ПТФЭ для производства подшипников. Во многих случаях несмазываемые подшипники должны работать при более высоких скоростях трения. При этом для не наполненного ПТФЭ характерны высокие значения коэффициента трения и скорости износа. В качестве материалов для несмазываемых подшипников, работающих в таких условиях, широкое применение нашли композиционные материалы, чаще всего на основе ПТФЭ.

Наиболее простым путем уменьшения относительно высокой скорости износа ПТФЭ при сухом трении является введение порошкообразных наполнителей. При этом повышается сопротивление ползучести при сжатии и наблюдается значительное увеличение износостойкости при сухом трении. Введение оптимального количества наполнителя позволяет повысить сопротивление износу до 10^4 раз.

Полимеры и композиционные материалы на их основе обладают уникальным комплексом физико-механических свойств, благодаря которым они успешно конкурируют с традиционными конструкционными сталями и сплавами, а в ряде случаев без применения полимерных материалов невозможно обеспечить требуемые функциональные характеристики и работоспособность специальных изделий и машин. Высокая технологичность и малая энергоемкость технологий переработки пластмасс в изделия в сочетании с вышеназванными достоинствами ПКМ делают их весьма перспективными материалами для деталей машин различного назначения.

ГЛАВА VI

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Человечество использует металлы и их сплавы несколько тысячелетий. Сначала металлы находили в виде самородков и россыпей, позже научились перерабатывать металлосодержащие руды.

Проверенным способом получения изделий из металлов было литье в земляные формы. Отливали наконечники для стрел и мечи, сельскохозяйственные орудия и инструменты, утварь и украшения.

Детали и узлы машин изготавливают литьем, сваркой, обработкой металлов давлением (включающей в себя ковку, штамповку и прессование) и резанием [1,2].

Процесс литья заключается в том, что расплавленный металл заливают в специальную литейную форму, имеющую конфигурацию заготовки. При охлаждении залитый металл затвердевает, сохраняя заданную форму.

Литье применяют для изготовления блоков цилиндров, поршней, коленчатых валов, зубчатых колес, станин станков, турбинных лопаток, корпусов и крышек редукторов. Литье экономически оправдано при крупносерийном и массовом производстве [3].

Литьем могут быть получены детали любых размеров и сложной формы с малыми припусками и даже без дополнительной обработки (точное литье). К его недостаткам относятся пониженная надежность литых деталей и невозможность изготовления деталей с тонкими и существенно отличающимися по толщине стенками [4].

За прошедшие с тех пор тысячелетия человек изобрел множество технологий обработки материалов и методов литья, включая литье под давлением, газифицируемые формы и порошковую металлургию. Старинные

способы также сохранились, но используются в основном в скульптурных мастерских и художественных промыслах.

По сравнению с другими материалами, такими, например, как воск или гипс, литье металлов отличается некоторыми особенностями. Первая из них — высокая температура перехода из твердого в жидкое состояние. Воск, гипс и цемент затвердевают при комнатной температуре.

Самые мягкие и легкоплавкие металлы - олово и свинец, которые можно отливать даже в деревянные матрицы. Температура плавления металлов гораздо выше — от 231°C у олова до 1531°C у железа.

Перед тем, как приступить к литью металла, его необходимо расплавить. И если олово можно расплавить в глиняной плошке на простом костре из подобранных рядом сучьев, то для плавления меди, не говоря уже о железе, понадобится специально оборудованная печь и подготовленное топливо. Для литья более тугоплавких металлов потребуются формы из смеси песка и глины. Некоторые металлы, как, например, титан, требуют для литья металлические формы. После заливки изделию требуется остыть. Многобазовые матрицы разбирают, однокбазовые формы разрушают, и отливка готова к дальнейшей механической обработке или к использованию.

В металлургической промышленности различают цветные и черные металлы. К черным относятся железо, марганец, хром и сплавы на их основе. Сюда же входят все стали, чугуны и ферросплавы. Черные металлы дают более 90% мирового потребления металлических сплавов.

Для литья крупных прочных и долговечных конструкций, не подверженных напряжениям изгиба или скручивания, как правило, используют *чугуны* [5].

Из сталей производят корпуса и детали транспортных средств от самоката до супертанкера, строительные конструкции, бытовую технику, станки и другое промышленное оборудование.

Цветные металлы, в свою очередь, в зависимости от физических свойств, и прежде всего, удельного веса, делятся на две большие группы:

1. Легкие цветные металлы. В эту группу входят алюминий, титан, магний. Эти металлы встречаются реже, чем железо, и стоят дороже. Их применяют в тех отраслях, где нужно снизить вес изделия — аэрокосмическая промышленность, производство высокотехнологичных вооружений, производство вычислительной и телекоммуникационной техники, смартфонов и малых бытовых приборов.

В частности, титан благодаря своему отличному взаимодействию с тканями человеческого организма широко применяется для протезирования костей суставов и зубов.

2. Тяжелые цветные металлы. Сюда относятся медь, олово, свинец, цинк и никель. Их применяют в химической промышленности, производстве электроматериалов, в электронике, на транспорте – везде, где требуются достаточно прочные, упругие и коррозионно-стойкие сплавы.

3. Благородные металлы. В эту группу входят золото, серебро, платина, а также более редкие рутений, родий, палладий, осмий, иридий. Первые три известны человеку с доисторических времен. Они редко (относительно меди и железа) встречались в природе и поэтому служили платежным средством, материалом для ценных украшений и ритуальных предметов. С развитием цивилизации золото и платина сохранили свою роль средства накопления богатств, однако стали весьма широко использоваться в промышленности и медицине из-за своих уникальных физико-химических свойств.

§ VI.1. Основные способы литья металлов

Традиционный метод

Металл просто заливается в форму. Как правило, изготавливается простая или составная модель из дерева, потом по модели делается матрица из песчано-глиняной смеси. Модель извлекают из формы. Форму

прокалывают тонкими острыми иглами, чтобы обеспечить газоотведение. Производят отливку и ждут, пока она остынет.

Недостаток метода - высокая трудоемкость изготовления форм и других операций, тяжелые условия труда и низкая экологичность.

Литье в металлические формы

Разъемную форму, называемую *кокилем*, изготавливают из металлических деталей. Части матрицы получают путем отливки или, если требуется обеспечить высокое качество поверхности и точность размеров, путем фрезерования. Формы смазывают антипригарными составами и производят заливку. После остывания *кокили* разбирают, извлекают отливки, очищают. Металлическая матрица выдерживает до 300 рабочих циклов.

Литье под низким давлением

Суть метода заключается в том, что тигель с металлом и матрицы для отливок располагаются в герметичной камере. Металлопровод из титанового сплава опускается из формы в расплавленный металл. В это время в камеру подают низкое избыточное давление воздуха или инертного газа. Металл попадает в матрицу под давлением, скорость потока весьма высока и при этом регулируется. Форма заполняется полностью и равномерно.

Метод позволяет получать высококачественные отливки, в том числе особо тонкостенные. Качество поверхности также превосходит отливки, получаемые традиционным методом. Литейные газы удаляются через отводящий трубопровод в систему очистки, откуда попадают в атмосферу. Метод отличается высокой автоматизацией операций, улучшенными условиями труда персонала и высокой экологичностью. К тому же при таком литье и материалы, и расход энергии существенно экономятся.

Литье под высоким давлением

Метод применяется как в черной, так и в цветной металлургии и позволяет получать наиболее точные и однородные отливки. Металл под

высоким напором поступает в матрицу со скоростью до 120 м/с и мгновенно заполняет ее.

Деталям, полученным таким методом, практически не требуется финишная механическая обработка. Таким методом можно отливать детали практически любой конфигурации, с тонкими стенками, с готовыми отверстиями и даже с готовой резьбой.

Инжекционное литье

Инжекционный метод от обычного литья под давлением тем, что металл попадает в матрицу в виде порошка, смешанного со связующим веществом. Формы делают из высокопрочных сталей.

Высокая текучесть смеси позволяет заполнить мельчайшие детали рельефа форм самой сложной конфигурации, включающих внутренние полости. Достоинством этого метода является высокая точность поверхности, делающая ненужной дополнительную механическую обработку или сводящую ее к минимуму. Другим преимуществом является высочайшая физико-химическая однородность отливки.

Литье по газифицируемым моделям

Модель выполняется не из дерева или воска, а из легкоплавкого и выжигаемого материала, преимущественно полистирола. Модель остается в форме и испаряется при заливке металла. Преимущества способа:

- модель не требуется извлекать из матрицы;
- можно изготавливать модели сколь угодно сложных отливок, не нужны сложные и составные формы;
- существенно снижена трудоемкость моделирования и формования.

Литье по выжигаемым моделям приобретает большую популярность на современных металлургических производствах.

Существуют и другие методы литья деталей, имеющие массовое применение. Различные способы литья имеют свои преимущественные сферы применения.

Так, литье в песчаные формы применяется при единичных отливках или малых сериях. Проверенный тысячелетиями способ понемногу уходит с промышленных предприятий, но продолжает использоваться на художественных промыслах и в скульптурных мастерских.

Литье в металлические формы применяется в случаях, когда требуется

- большие тиражи отливок;
- высокая точность размеров;
- высокое качество поверхности.

Также литье в металл популярно в ювелирной промышленности и в производстве металлических украшений.

Литье под давлением все шире используется предприятиями, сфокусированными на качестве своих изделий, следящими за экологией, охраной труда и эффективным расходованием материальных и энергетических ресурсов.

Литье по газифицируемым моделям применяется в тех случаях, когда планируются большие тиражи отливок, требуется высокая точность и экономия трудоемкости.

§ VI.2. Применение литья в машиностроении

Особенности реализации процесса стального литья

Сталь классифицируют по разным признакам: химический состав, способ производства, назначение, способ придания заготовкам формы будущей детали. За признаком химического состава сталь классифицируется на два таких вида: легированная и углеродистая. За способом производства различают такие типы сталей: мартеновская (основная и кислая), конверторная (бессемеровская (кислая) и томасовская (основная), электросталь (кислая и основная).

Для того чтобы изготовить большой объем продуктов стального литья, то до сих пор используют мартеновские печи. Мартеновским способом выплавляется сталь любого качества (как конструкционная углеродистая, так и инструментальная): высоко, среднего и низкого.

Малоответственное стальное литье из углеродистой и низколегированной стали при небольшом его количестве, требует применения бессемеровских (с кислой футеровкой) и томасовских (основная футеровка) конверторов.

За назначением сталь подразделяют на два основных вида: конструкционная, которая применяется при изготовлении деталей и машин, а также металлических конструкций, и инструментальная, используемая в производстве режущих, мерительных, штамповых и других инструментов.

За способом придания изделиям формы, выделяют литую, кованную, катаную стали. Из литой стали изготавливают фасонные отливки, которые являются заготовками для деталей машин. Большинство наименований деталей машин производят из стандартных профилей проката или из периодического профиля прокатной стали (например, из уголков, швеллеров, труб, полос, листов). В качестве заготовок часто используют поковки и штамповки, как холодные, так и горячие.

Изготовленные из углеродистой стали или из иных легированных сталей фасонные стальные отливки имеют различную конфигурацию массы, в основном она колеблется в диапазоне *10 г* до *20 т*. Данные изделия широко используются во всех сферах жизни, основное же применение – машиностроение. Более 20% всех отливок изготавливается из стали.

Для производства стальных отливок используют металлические или песчаные формы. Литниковая система (различные каналы и резервуары) помогает подводить металл в полость формы. Для удобства транспортировки сталелитейные цехи фасонных стальных отливок разрабатывают единой системой с машиностроительным заводом. Такие сталелитейные цехи не могут принимать жидкий чугун, поскольку не имеют доменных печей.

Фасонные стальные отливки имеют три класса, которые напрямую зависят от классов припусков их механической обработки и допускаемых отклонений по весу.

В цехах для литья при изготовлении фасонных стальных отливок чаще всего применяют кислые электродуговые печи. Невозможность удаления вредных примесей заставляет применять технологию использования чистых исходных материалов, которыми могут являться отходы собственного производства. Для этого в окислительный период добавляют некоторое количество железной руды, обязательно чистой от серы и фосфора. Для производства фасонных стальных отливок можно использовать низко- и среднеуглеродистые стали, которые выплавляют мартеновским способом. Кислая мартеновская сталь имеет превосходные механические свойства, высокую текучесть и является наилучшим материалом для производства фасонных стальных отливок.

По окончании процесса затвердевания получают отливки с крупнозернистой структурой, что в обязательном порядке влечёт за собой необходимость отжига.

Процесс отжига измельчает зерно, улучшает механические свойства и уничтожает внутреннее напряжение, которое появляется в отливках после процессов затвердевания и охлаждения.

Процесс выравнивания обеспечивается диффузионным отжигом, который применяют при производстве объёмных отливок или крупных слитков. Этот процесс необходим для изделий из легированной стали, которые характеризуются высокой химической неоднородностью.

В сравнении с чугунами, стальные отливки имеют большую надёжность и долговечность в работе, а так же выносливость при эксплуатации в высоких температурах. Выплавка последних лет показывает, насколько возрос интерес к подобным изделиям, это связано с повышением требований относительно прочности, сроков службы машин и облегчения. В производстве наблюдается тенденция увеличения не только тоннажа, но и

номенклатуры, так всё больше внимания уделяется литью из легированных конструкционных сталей. Технологически правильно изготовленные отливки не имеют внутренних трещин, газовых и усадочных раковин. А значит, не уступают по механическим свойствам кованным деталям, но значительно «уступают» в цене.

Процесс производства трудоёмкий и долгий, многое зависит от рациональной конструкции детали, правильной разработки технологии литья, качественной формовки, термической обработки. Большое внимание уделяется контролю выпускаемой продукции. Стальные отливки широко используются для изготовления запасных частей к насосному и компрессорному оборудованию, деталей для котельных и грузоподъёмных механизмов и машин, железнодорожного транспорта и электротехнической, машиностроительной, цементной и обогатительной промышленности. По плечу не только крупное производство, но и выпуск водостоков, плитки, решеток и ограждений.

Благодаря надежности производимых литьём изделий и большому выбору металла для использования в данной процедуре, огромная востребованность литых деталей сделали производство стальных отливок очень популярным в металлургии.

В настоящее время существует огромное множество всевозможных способов их производства стальных отливок (см. *рис. VI.1*).



Рис. VI.1. Процесс кокильного литья

Но особенно можно отметить несколько самых популярных: литье в кокиль, центробежное литье и литье в оболочковые формы. Данные виды литья используются не только для производства именно стальных отливок, но подходят и для других металлов, таких как алюминий, медь и прочие.

Машиностроение требует серьезных деталей, изготовление которых является довольно трудоемким процессом. Заготовки для тяжелых машин из чугуна и стали изготавливаются с помощью отливок в металлические, земляные и оболочковые формы. Небольшие, но сложные детали отливаются по выплавляемым моделям. Качество литья регулируется в соответствии с стандартами [6].

Литье в земляные формы изделий для машиностроения осуществляется с помощью механической или ручной формовки.

Ручные формовки отличаются низкой точностью размеров – приблизительно девятый класс точности, изделия получают со значительными припусками и нестабильным качеством. Такое производство достаточно трудоемкое, при нем формы набиваются неоднородно. Однако при единичном литье в машиностроении для изготовления уникальных заготовок больших размеров ручной способ с применением деревянных моделей сегодня продолжает оставаться основным методом получения отливок.

В нынешнее время мощность тяжелых машин стремительно растет, для этого требуются детали с большими габаритами и весом. Чаще всего таковые применяются при конструировании уникальных станков, прессового и прокатного оборудования.

Литье в машиностроении в нынешнее время требует крупной отливки, так как необходимо создание моноблочных деталей, имеющих сложную форму. Такие детали воспринимают нагрузку в несколько тысяч тонн, поэтому их производство требует точности и качества.

Самое крупное литье в машиностроении за несколько последних лет – *архитрав* гидравлического пресса, его вес составил *145 тонн*. В 1985 году фирма «*Bochumer Verein AG*» (ФРГ) изготовила также одну из крупных отливок – станину рабочей клетки прокатного стана.

Литье в металлические формы, несмотря на сравнительно небольшие партии заготовок, также находит широкое применение на машиностроительных производствах.

В последние годы для отливки повторяющихся изделий из чугуна и стали, имеющих формы тел вращения и крупные размеры, часто стали использовать *полукокильные формы*. Основной частью полукокильной формы является металлический жакет, на который тонким слоем облицовочной смеси наносится облицовка. Благодаря небольшой толщине такого слоя отливок в такой форме остывает на много быстрее, чем в обыкновенной.

Литьё в кокиль (*чистококильное литьё*) имеет одну весьма важную и специфическую особенность, невозможность разрушения формы, что позволяет извлекать деталь обычным переворачиванием кокиля. Поскольку, это приводит к некоторым ограничениям в выборе внешней формы будущей модели, то таким образом можно производить очень простые детали. Но литьё в кокиль обладает и рядом положительных моментов: возможность использовать форму не однократно, низкие затраты по производству, точность производимых деталей, отсутствие лишних включений в отливке.

Обычно такой способ литья не используется для изготовления стальных отливок, он больше подходит для меди или алюминия, а сами *кокили* производят из стали или чугуна.

При литье в оболочковую форму используют нагретую модель, сделанную из металла, в которую высыпается песок с примесью неполимеризованного термореактивного материала. Выдержав нужный срок, образуется слой смеси, в которой частицы пластмассы сплывились и образовали твердую форму. После форму снимают с детали и, закопав в песок для большей жёсткости, заливают металлом. Для создания внутренних

полостей используют керамические стержни. Полученные стальные отливки используются для производства: радиаторов парового и водяного отопления, для производства некоторых деталей машин и так далее.

Сравнивая *полукокильные формы с чистококильными*, то первые имеют некоторые преимущества в машиностроительной отрасли.

Отливки, изготовленные с помощью *полукокиля*, не образуют трещин, благодаря ему увеличивается прочность металлических жакетов, также осуществляется сокращение затрат на их производство. Отливки, сделанные таким способом, отличаются высокой точностью размеров, наилучшей чистотой поверхности, что позволяет делать минимальные припуски при механической обработке. Структура отливок мелкозернистая, что увеличивает их стойкость и прочность.

Центробежное литье в машиностроении используется тогда, когда изделие имеет форму тела вращения. Металл заливают во вращающуюся металлическую форму, при вращении он прижимается к стенкам формы, и это позволяет получать отливки высокой точности. Такой метод литья обеспечивает деталям большую плотность и более высокие механические свойства отливок.

Кроме того можно изготовить детали имеющие тонкие каналцы в форме, путем её вращения под разными углами. Благодаря такому способу можно производить тонкостенные формы, если усилить силу, воздействующую на жидкий металл. Стальные отливки, полученные центробежным литьем, применяются при производстве труб, дискообразных изделий, втулок и даже в ювелирной промышленности [7,8].

Электрошлаковое литьё

В последние годы в металлообрабатывающей промышленности стали широко применять новый способ выплавки стали высокого качества – электрошлаковый переплав. Один из самых современных способов выплавки стали. С его помощью выплавляется самая чистая сталь, то есть та, которая

состоит из наименьшего количества примесей. При помощи электрошлакового переплава изготавливают специальные стали: нержавеющая, шарикоподшипниковая, инструментальная, быстрорежущая [9]. В этом случае сначала получают жидкий металл методом электрошлакового переплава (рис. VI.2).

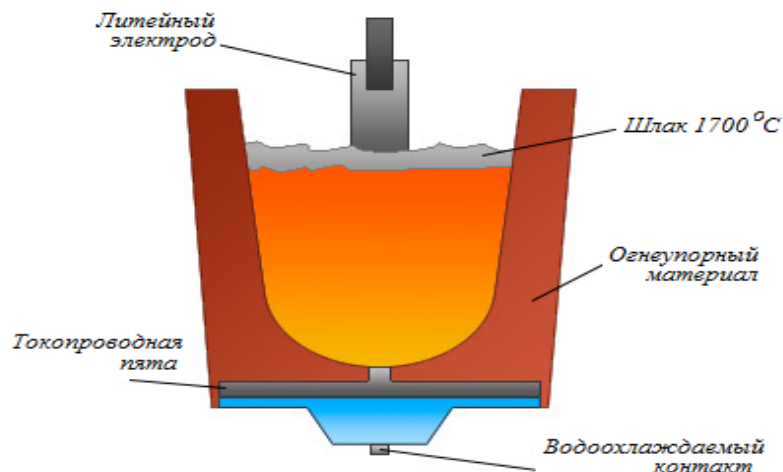


Рис. VI.2. Электрошлаковое литье

Переплав осуществляется за счет теплоты, выделяющейся при прохождении электрического тока через расплав электропроводящего шлака. Затем жидкий металл (не соприкасаясь с воздухом) поступает в водоохлаждающий медный кристаллизатор, являющийся литейной формой.

Электрошлаковое литье применяется в основном для изготовления сравнительно несложных отливок, например коленчатых валов.

Для того чтобы получить мелкое и среднее стальное литье применяют дуговые электрические печи, которые работают на трехфазном переменном токе. Также применяются печи сопротивления и индукционные печи.

Существует еще множество и других способов производства стальных отливок, таких как: литье по выплавляемым моделям, литье под давлением и так далее. Каждый способ обладает своими преимуществами, но и недостатки имеются. Поэтому для производства нужной детали следует подбирать правильный способ литья.

Стальные отливки с наливной формой. Литьё по газифицируемым («выжигаемым») моделям (далее сокращенно ЛГМ) по качеству и точности отливок, а так же условиям труда и безопасности относится к высоким технологиям в литейном производстве. Данная технология перешагнула свой 50-летний рубеж, но, не смотря на это, сохраняет свою популярность и набирает всё большие обороты в распространении. Сегодня стальные отливки, производимые с использованием ЛГМ – процесса чаще всего применяют с формами из сухого песка, которые вакуумируют без добавления связующих веществ. Однако одна из первых технологий подразумевала добавление связующего (*"Full Mold Process"*). Наиболее подходящими смесями для связки оказались самотвердеющие жидкоподвижные смеси, которые не требуют динамического уплотнения. Это очень важная сторона вопроса, поскольку речь идёт о невысоких по прочности материалах и формах с высокой возможностью деформации. Действие превышать 1 кг/см^2 внешних нагрузок не должно в момент формовки.

Использование форм из пенополистерола не позволяет использовать методы встряхивания, прессования и формовки пескомётом, даже ручная трамбовка может повлечь за собой деформацию. Из вышесказанного можно сделать вывод, что массовое производство по данной технологии не возможно. Наиболее оптимальным вариантом является применение сыпучих, жидкоподвижных и самотвердеющих смесей. Для уплотнения таких материалов достаточно применения вибрации. К сожалению песчано-глинистая смесь не применяется для стальной отливки, поскольку не отвечает указанным характеристикам.

Обе технологии были изобретены практически в одно время, и их с гордостью можно отнести к самым значимым изобретениям литейного производства прошло века. Приятно осознавать, что авторство технологии принадлежит российским и украинским литейщикам.

Стальная отливка с применением сразу двух технологий крайне сложна в воспроизведении, поскольку происходит наложение факторов, которые

присуще технологиям. Так газовый режим литейной формы предполагает выяснение технологом литейного производства закономерностей взаимозависимых составляющих химических, физических, гидродинамических процессов. Только при соблюдении всех норм можно располагать на получение качественных стальных отливок. Использование форм с материалами, связующими собственный газовый режим происходит создание мощного источника газовыделения. Это является результатом газификации *пенополистирола* формы температурой заливаемого в неё металла. Вопрос правильной организации вывода газов из полости формы в процессе деструкции модели в форме и её одновременном дожигании требует большого внимания, как со стороны технологов, так и со стороны ответственных за безопасность труда и экологии.

Наилучшими технологическими свойствами обладают пески групп K0315 и K020. Чем выше дисперсность песка, тем ниже газопроницаемость и текучесть. Хороший результат даёт речной песок с округлой формой зёрен. Глинистая составляющая не должна превышать 2%, это способствует образованию допустимой влажности в 5,5%, а соответственно и технологически безопасному уровню газообразования. Оптимальный результат твердения характеризуется равномерной высокой прочностью смеси, что может быть определено раздавливанием небольшого комочка пальцами. Если же процесс отвердевания не равномерный на поверхности и в середине, это указывает на неполное завершение химического процесса, как результат повлечёт за собой негативный газовый баланс. Стальные отливки, произведённые указанным способом, отличаются высокой прочностью. Поэтому работа над совершенствованием технологии в значительной мере позволит расширить горизонты применения и снизить стоимость.

Чугунное литье

Чугун возник еще в 18 веке в России. Тогда его в основном применяли в роли предметов быта и посуде. Но так было недолго и вскоре чугунное

литье охватило всю сферу строительства и машиностроения. Из чугуна выполняли детали для крепежа, трубы и так далее. Огромный ассортимент форм толкало чугунное литье на продвижение вперед. После чего его стали использовать для производства колес и прессов. Именно такой показатель многозадачности и содействовал для развития литейщиками этой отрасли. Очень значимым в развитии литья стало производство пушек.

В качестве припыла для чугунного литья применяется не что иное, как графит. Он может быть черный, но чаще всего используют серебристый. Характеристика литья из чугуна несколько отлична. Все зависит от того, выполняются кольца с помощью вырезки из маслот либо же их отличают в индивидуальном порядке. Использование кокиля для литья чугуна является более экономичным в плане затрат, так как литье в песчаные формы выйдет на тридцать-сорок процентов дороже. Литье из чугуна проходит специальную процедуру, которая называется выбивкой. Она заключается в отделении от остывших и затвердевших отливок формовочного материала.

Для выполнения литья из чугуна и стали, используют жеребейку из малоуглеродистой стали, если литье выполняют из медных сплавов, используют жеребейку из латуни. Жеребейки нужны для использования в роли дополнительных опор стержня непосредственно в форме. Они состоят из стоек, с помощью которых они закрепляются и пластин (опорных поверхностей). Чугунное литье не является полной однородностью.

Исправить дефекты возможно как в процессе механической обработки, так и до нее, а также даже такие детали, которые уже были в эксплуатации. Чтобы улучшить качество чугунного литья используют модифицирование. Модели, используемые для чугунного литья, обычно красят в красный цвет, только яркими цветами, бросающимися в глаза, можно правильно увидеть и впоследствии использовать форму, которая рассчитана непосредственно для чугунного литья.

Как и любой другой металл, чугун может поддаваться коррозии. Стойкость, к которой можно обеспечить только с введением в чугун меди,

хрома, а также никеля. Только так можно добиться, чтобы чугунное литье было устойчивое в органических и минеральных кислотах, в морской воду и щелочах, широко применяться в пищевой, бумажной и химической промышленности.

Во время обработки литья на фрезерных, токарных и иных станках крайне опасно нахождение на механизмах частичек песка или окалины.

Корпуса, выполненные из чугунного литья, преимущественно распространяются среди конструкций небольших габаритов в условиях серийного производства. Только в этом случае затраты на механическую обработку и изготовление модели будут не велики. Чугунное литье чаще всего приобретают предприятия, которые выпускают электродвигатели машиностроительного назначения. После окончания всех процессов по выполнению чугунного литья, производится обработка отливки с помощью металлической щетки и последующее отбеливание с использованием химических составов.

Дефекты на отливках из чугуна. Качество отливки из чугуна прямолинейно зависит от его химической структуры. Наличие в большом или низком количестве определенных химических элементов может привести как к улучшению структуры металла, так к ухудшению, а также повлиять на некоторые механические свойства.

Чугун отличается от других металлов, тем, что при помощи скорости охлаждения и затвердевания отливки, человек может изменять его структуру. От структуры металла зависит наличие и качество таких свойств отливок, как износостойкой, герметичность будущего изделия, механические свойства. Если повысить скорость охлаждения отливки во время литья в кокиль, то это приводит к таким последствиям: понижение уровня и размеров графитных включений, повышению количества перлита и уменьшению его зерна, и в итоге механические свойства отливок из чугуна улучшаются.

Но следует помнить, что высокая скорость приводит к некоторым неприятным последствиям: образование отбеленного слоя на поверхности

отливки. В поверхностном слое углерод практически полностью пребывает в виде цементита, который и определяет высокую твердость структуры металла. Отливки из чугуна с отбеленной поверхностью подлежат трудной обработке, однако обладают высоким уровнем износостойкости. Как правило, такие отливки применяются без механической обработки, или после процесса шлифования. Чугунные отливки с таким дефектом, подвергающиеся обработки резанья, должны подвергаться предварительной термической обработке – графтитизирующему отжигу, который устраняет отбел. Но для отжига металла потребуется дополнительное оборудование, которое достаточно дорогостоящие, и увеличивает энергозатраты и длительность технологического процесса. Поэтому получение отливок при помощи кокилей с заданной структурой, на сегодня является проблемой. Но основным выходом из такой ситуации сейчас считаются: правильный выбор химического состава металла, снижения скорости охлаждения.

К числу других дефектов чугунных отливок считаются неслитины и недоливы. Они появляются при литье в кокиль, в результате невысокой температуры кокилей либо самого заливаемого металла, но ещё влияет на их появление и большая протяженность литниковых каналов, недостаточная площадь их поперечного сечения, трещины, что были вызваны нетехнологичной конструкцией отливки либо прогревом кокиля.

§ VI.3. Горячая и холодная обработка металлов давлением

Обработку металлов давлением активно используют в современной промышленности. Данная отрасль металлообработки основана на пластичной деформации материала под действием внешних сил. Особенностью технологии является повышение физических и механических свойств в процессе изменения формы заготовки.

Деформация может быть упругой или пластичной. В первом случае после прекращения воздействия внешних сил заготовка восстанавливает

первоначальные размеры. Во втором случае изделие сохраняет полученную форму [10]. Полное изменение формы заготовки является суммой упругой и пластинчатой деформаций.

Сущность обработки давлением заключается в изменении первоначальной формы заготовки под действием внешних сил. Такой метод позволяет получать изделия сложной формы. Вместе с этим улучшается кристаллическая структура материала и повышаются его механические свойств (рис. VI.3).

Способы обработки металлов давлением отличаются степенью нагрева заготовки. Холодный метод характеризуется температурой, значение которой ниже порога рекристаллизации металла. В этом случае для изменения формы к заготовке необходимо прикладывать значительные усилия. Горячий вид обработки отличается высокой степенью нагрева заготовки, который превышает температуру рекристаллизации.

Рассмотрим основные способы обработки металлов давлением, а также некоторые особенности технологических процессов.

Прокатка

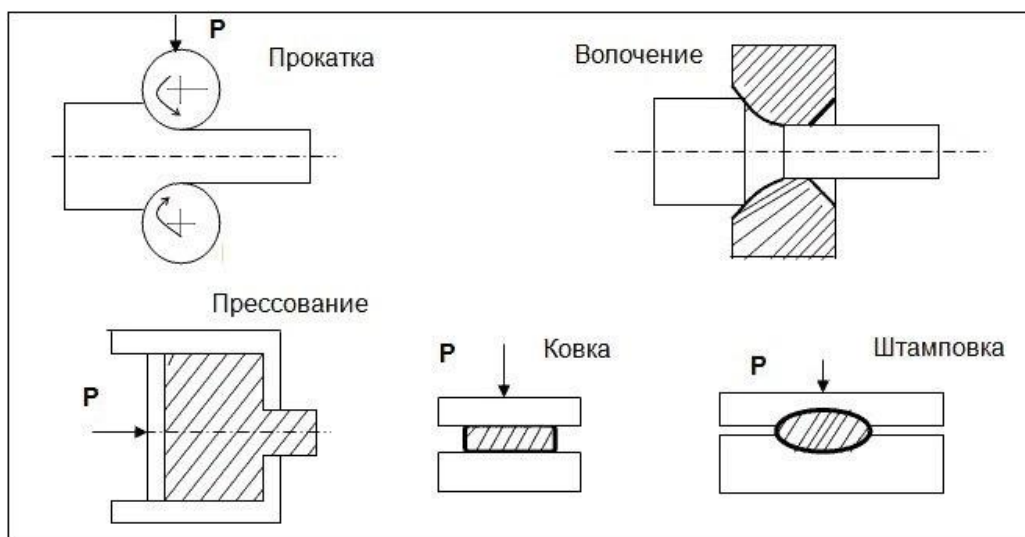


Рис. VI.3. Способы обработки металлов давлением

При прокатке металлов основными инструментами, воздействующими на заготовку, являются специальные валки. От их формы зависят тип и структура будущего изделия.

Комплекс оборудования по производству деталей называется прокатным станом. С его помощью выпускают детали как холодным, так и горячим способом.

Существует три способа прокатки (рис. VI.4):

1. Продольная. Самый популярный метод обработки. Заготовку пропускают между двумя валками, которые вращаются в противоположные стороны. Изменение размеров готового проката производят путем регулировки зазора между рабочими элементами.

2. Поперечная. Способ характеризуется отсутствием поступательных движений в процессе обработки. Применяется для изготовления деталей цилиндрической формы: шаров, втулок и прочих тел вращения.

3. Поперечно/продольно-винтовая. Валки располагаются под определенным углом к заготовке. Таким образом металлу придают вращательное и поступательное движение. С помощью винтовой прокатки изготавливают сверла, цельнокатанные трубы, оси, а также изделия полый структуры.

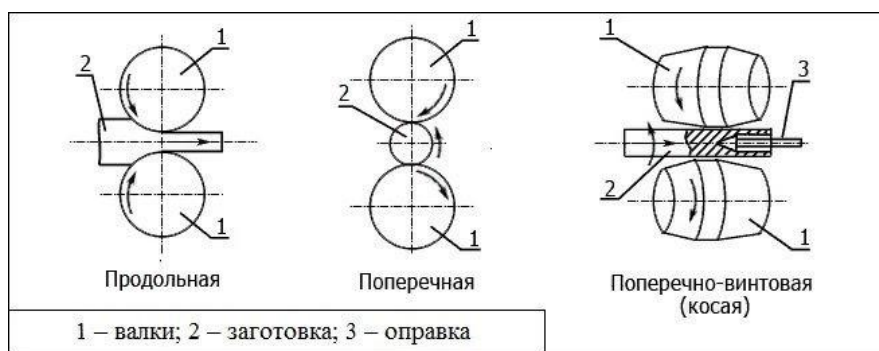


Рис. VI.4. Три способа прокатки специальными валками

На долю данной технологии приходится около 80% всей выплавляемой стали.

Методы прокатки постоянно совершенствуются. Например, на передовых предприятиях сейчас внедряют технологию бесконечной холодной прокатки. Для этого на стан устанавливают сварочную машину.

Она соединяет рулоны или заготовки между собой. Таким образом, на стан поступает фактически «бесконечная» полоса.

При наиболее распространённой продольной прокатке на заготовку со стороны валков действуют нормальные силы N и сила трения T .

Условия захвата металла валками можно записать:

$$N \sin \alpha < T \cos \alpha \quad (VI.1)$$

Выразив $T = f N$, где f – коэффициент трения, и подставив это выражение в условия захвата, получим

$$\sin \alpha < f \cos \alpha \text{ или } f > \operatorname{tg} \alpha, \quad (VI.2)$$

Для осуществления захвата металла валками необходимо, чтобы коэффициент трения между валками и заготовкой был больше тангенса угла захвата.

При горячей прокатке стали гладкими валками угол захвата равен $15 \div 24^\circ$, при холодной – $3 \div 8^\circ$. При установившемся процессе прокатки коэффициент трения может быть примерно вдвое меньше.

Деформацию заготовки обычно определяют относительным обжатием, в %:

$$\varepsilon_n = (H_o - H_l) 100 / H_o, \quad (VI.3)$$

где, H_o и H_l – высота заготовки соответственно до и после прокатки. Для обжатия по сечению различно используют показатель, называемый вытяжкой,

$$\mu = l/l_0 = F_0/F, \quad (VI.4)$$

где l_0 и F_0 – первоначальные длина и площадь поперечного сечения; l и F – те же величины после прокатки.

Вытяжка при прокатке обычно составляет $1,1 \div 1,6$ за проход, но может быть и больше.

Холодная штамповка

Холодную штамповку считают самым экономным технологическим процессом. Уровень отходов металла не превышает 10%. Для горячей

обработки этот показатель составляет $20\div 25\%$. Для сравнения: при механической металлообработке заготовок уровень отходов в виде стружки может достигать 50% .

Ковка

Высокотемпературная операция, которая известна еще с древних времен. Степень нагрева зависит от характеристик металла. Как правило, температурный показатель не превышает 1000°C . Этого достаточно для потери слитком прочности и приобретения повышенной пластичности, что позволяет мастеру кузнечного дела изготавливать различные детали для нужд производства или украшения интерьера.

Технологический процесс состоит из следующих этапов:

1. Разделка слитка на части заданных размеров.
2. Порубка – операция обработки наружной поверхности заготовки.
3. Получение чернового варианта изделия. Для этого удаляют лишний материал.
4. Удлинение детали путем уменьшения ее поперечного сечения. Такую операцию называют вытяжкой.
5. Пробой отверстий необходимого диаметра выполняют с помощью специального инструмента.
6. В случае необходимости изделию придают изгиб с помощью шаблона.
7. Завершающие операции. Это может быть чеканка, изменение рельефа или создание надписи на изделии.

Для ковки в промышленных условиях используют плоские бойки, которые представляют собой параллельные плиты и гидравлический пресс [11].

Преимущества технологии:

- улучшение механических свойств;

- возможность обработки деталей больших размеров, массой до 250 тонн;
- высокая автоматизация;
- низкая себестоимость производства.

Прессование

Одна из разновидностей обработки металлов давлением. Слиток закладывают в специальную форму закрытого типа. Пуансон вытесняет изделие из полости матрицы. В качестве силового агрегата используют мощный пресс.

Методом прессования изготавливают детали с различным профилем. В качестве основного материала используют металлы с высокой хрупкостью:

- медь;
- алюминий;
- олово;
- магний;
- титановые сплавы.

Использование сменной матрицы позволяет изготавливать детали различной формы.

Объемная штамповка

Одна из самых распространенных технологий – обработка металла давлением. В качестве проката чаще всего используют материалы круглого или прямоугольного сечения. Предварительно нагретая болванка подвергается серии последовательных деформаций без нарушения целостности.

Для придания слитку окончательной формы используют специальные объемные штампы, которые повторяют контуры будущего изделия (рис. VI.5).

Термин объемная указывает на то, что геометрия и габариты заготовки меняются одновременно в двух или трех измерениях.

Разновидность технологии обработки металлов давлением, с помощью которой изготавливают плоские и объемные тонкостенные изделия из материала листового типа.



Рис. VI.5. Примеры изделий изготовленных с помощью специальных объемных штампов

Листовую штамповку применяют для изготовления большого количества идентичных деталей высокой точности. В качестве материала применяют различные металлы и сплавы, а также некоторые виды пластмасс.

Существует множество разновидностей рабочего оборудования:

- кривошипно-шатунные;
- гидравлические;
- радиально-ковочные;
- электромагнитные.

Диапазон применения технологии очень широк: от производства тонкостенных корпусов для бытовой техники до изготовления элементов крупных морских судов.

Холодная листовая штамповка, то есть объёмная деформация без нагрева заготовки позволяет получить большую точность размеров и лучшее качество поверхности по сравнению с обработкой давлением при достаточно высоких температурах. Отметим, что обработка давлением без специального нагрева заготовки позволяет сократить продолжительность технологического цикла, облегчает использование средств механизации и автоматизации и повышает производительность труда.

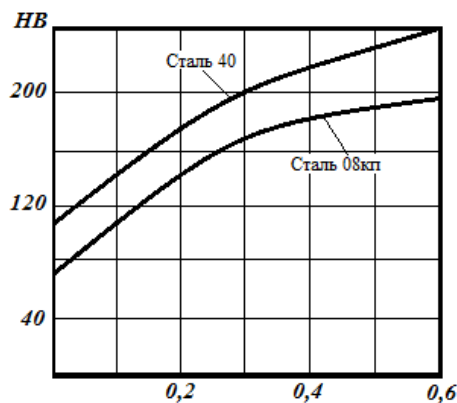


Рис. VI.7. Изменение твёрдости стали в зависимости от степени холодной деформации, %

Горячая объёмная деформация характеризуется таким соотношением скоростей деформирования и рекристаллизации, при котором рекристаллизация успевает произойти во всём объёме заготовки, и микроструктура после обработки давлением оказывается равноосной, без следов упрочнения.

Каждый металл нагревается до вполне определённой максимальной температуры. Если нагреть металл близкой к температуре плавления, то наступит пережог, выражающийся в появлении хрупкой плёнки между зёрнами металла вследствие окисления их границ (неисправимый дефект – брак). Ниже температуры пережога находится зона перегрева. Явление перегрева заключается в резком росте размеров зёрен. Брак по перегреву в большинстве случаев можно исправить отжигом.

Надо помнить, что в процессе обработки нагретый металл обычно остывает, соприкасаясь с более холодным инструментом и окружающей средой. Заканчивать горячую обработку давлением следует также при вполне определённой температуре, ниже которой пластичность вследствие упрочнения падает и в изделии возможно образование трещин.

Заготовка должна быть равномерно нагрета по всему объёму до требуемой температуры. Разность температур по сечению заготовки приведут к термическим напряжениям. Для уменьшения толщины

обезуглероженного слоя (который достигает $1,5 \div 2 \text{ мм}$), заготовки нагревают в нейтральной или восстановительной атмосфере.

При горячей деформации сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной деформации, а отсутствие упрочнения приводит к тому, что сопротивление деформированию (предел текучести) незначительно изменяется в процессе обработки давлением. Этим обстоятельством объясняется в основном то, что горячую обработку применяют для изготовления крупных деталей, так как при этом требуются меньшие усилия деформирования (менее мощное оборудование).

При горячей деформации пластичность металла выше, чем при холодной деформации. Поэтому горячую деформацию целесообразно применять при обработке труднодеформируемых, малопластичных металлов и сплавов, а также заготовок из литого металла (слитков). Кристаллическое строение слитка неоднородно (кристаллы различных размеров и форм). Кроме того, в нём имеется пористость, газовые пузыри и т.д. горячая обработка слитка приводит к деформации кристаллов и частичной заварке пор и раковин, что приводит к увеличению плотности металла и мелкозернистому строению. В то же время при горячей деформации окисление заготовки более интенсивно (на поверхности образуется слой окалины), что ухудшает качество поверхности и точности получаемых размеров.

Температуры нагрева различных металлов: АК4 $470 \div 350^\circ \text{C}$; БрАЖМц $900 \div 750^\circ \text{C}$; ВТ8 $1100 \div 900^\circ \text{C}$; Сталь 45 $1200 \div 750^\circ \text{C}$; У10 $1100 \div 850^\circ \text{C}$.

Продукция прокатного производства

Форму поперечного сечения прокатной полосы называют профилем. Совокупность форм и размеров профилей, получаемых прокаткой, называют сортаментом.

В ГОСТах на сортамент проката приведены площадь поперечного сечения, размеры, масса одного метра длины профиля и допустимые отклонения от номинальных размеров.

Сортамент прокатываемых профилей разделяется на четыре основные группы:

- сортовой прокат;
- листовой;
- трубы;
- специальные виды проката.

Сортовой прокат делят на профили простой геометрической формы (квадрат, круг, шестигранник, прямоугольник) и фасонные (швеллер, рельс, угловой и тавровый профили и т.д.).

Цветные металлы и их сплавы прокатывают преимущественно на простые профили – круглый, квадратный, прямоугольный.

Алюминиевый профиль может быть самым разнообразным, но самым популярным из этого многообразия является швеллер. Он используется практически во всех производственных сферах, судостроении и машиностроении, но особенно востребован в строительстве – для отделки офисных помещений и при производстве конструктивных элементов в строительстве: окон и дверей (*рис. VI.8*).



Рис. VI.8. Конструктивные элементы из алюминиевых сплавов

Алюминиевый швеллер имеет высокую пластичность, благодаря которой возможно создавать металлоконструкции даже очень сложных форм, а его коррозионная стойкость позволяет использовать его для наружного использования.

Листовой прокат из стали и цветных металлов используют в различных отраслях промышленности. Листовую сталь делят на автотракторную, трансформаторную, кровельную жёсть и т.д.

Кроме того, листовую сталь разделяют на толстолистовую (толщина $4 \div 160 \text{ мм}$) и тонколистовую (толщиной *менее 4 мм*). Листы толщиной *менее 0,2 мм* называют фольгой.

Трубы разделяют на бесшовные и сварные. Трубы прокатывают из углеродистых и легированных сталей.

К специальным видам проката относят колёса, шары, периодические профили с периодически изменяющейся формой и площадью поперечного сечения вдоль оси заготовки.

§ VI.4. Волочение и прессование

Волочение

Самый востребованный метод в трубном производстве. Суть производственного процесса заключается в протягивании болванки через фильеру. Так называют специальные волокна, размер которых меньше поперечного сечения заготовки.

Наиболее распространенными методами волочения являются:

- безоправочное;
- профилировочное;
- длиннооправочное;
- короткооправочное;
- на самоустанавливающейся оправке.

В зависимости от требований технологического процесса заготовку могут подвергнуть предварительному нагреву. При использовании болванки большого размера ее могут пропускать через несколько фильер с постепенным уменьшением величины сечения. Валки обычно изготавливают из инструментальной стали или твердых сплавов.

С помощью волочения можно изготовить детали с высокой точностью, например, проволоку толщиной несколько микрон.

К слиткам для волочения предъявляют повышенные требования, поскольку большая часть дефектов переходит на готовое изделие.

Основным недостатком безправочного волочения при производстве труб является низкое качество внутренней поверхности.

Волочение - процесс, заключающийся в протягивании заготовки через постепенно сужающееся отверстие в волоке (*рис. VI.8*). Волочение металлов осуществляется в холодном состоянии, за исключением, таких как *W, Mo, Zn*. Волочением получают проволоку, тонкостенные трубы, фасонные профили, шпонки, спицы и т.д.

Процесс деформации при волочении характеризуется коэффициентом вытяжки $\mu = l/l_0 = F_0/F$ и обжатия ψ . Величины $\mu = 1,15 \div 1,3$, $\psi = 30 \div 35\%$. Максимальное уменьшение диаметра или толщины при волочении за один проход составляет $5 \div 14\%$. Скорость волочения $5 \div 10 \text{ м/с}$.

Инструментом для волочения является волока (*рис. VI.8*), отверстие которой имеет определённую форму, обеспечивающую оптимальные условия деформирования. Волоки изготавливают из инструментальных сталей, твёрдых сплавов и технического алмаза. Для уменьшения трения при волочении применяют различные смазки и покрытия.

Оборудованием для волочения являются волочильные станы. Они подразделяются на группы в зависимости от типа тянущего устройства (*цепные, барабанные, реечные, винтовые*).

Цепные служат для протягивания профилей в виде длинных штанг ($5 \div 8 \text{ м}$ и более).

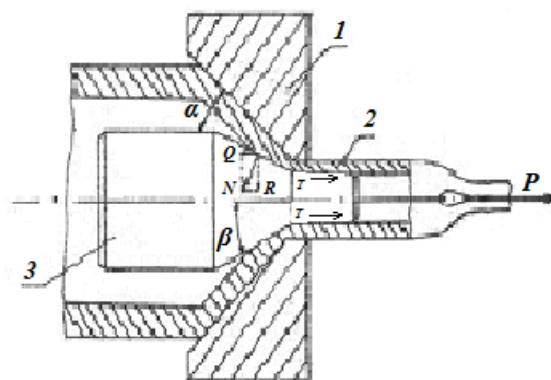


Рис. VI.8. Волочение на самоустанавливающейся оправке:

1 – волокна, 2 – труба, 3 – оправка

Барабанные станы применяют для волочения проволоки, тонких труб, наматываемых в бунты. Они могут быть однократного и многократного волочения (до 25 протяжек).

В волочильных станах предусмотрена возможность проведения межоперационного отжига заготовок для снятия наклёпа. Волочение заключается в однократном или многократном протягивании металла на особых станках через отверстие, площадь поперечного сечения которого меньше, чем площадь поперечного сечения протягиваемой заготовки.

Отверстие, через которое протягивают металл («очко» или «глазок»), находится в инструменте, который называется волоком (фильером). Заостренный конец протягиваемой через очко заготовки захватывается клещами, которые перемещаются тянущим устройством привода.

После волочения получают изделия (проволока, прутки, трубы и др.) с точными размерами и с весьма гладкими, но наклепанными поверхностями.

Путем волочения получают проволоку диаметром от 0,01 до 4 мм и выше. Проволоку малых диаметров образуют многократным пропуском ее через несколько (до 17) волоков, постепенно уменьшающихся в диаметре. Волоки изготовляют из твердых сплавов, а в некоторых случаях из алмазов (например, для волочения проволоки диаметром менее 0,5 мм). Наклеп на поверхности металла, возникший при его волочении, устраняют отжигом.

Волочение труб применяют для калибровки их размеров и получения более гладкой поверхности, а также в некоторых случаях для утонения их стенок. В последнем случае при волочении внутрь трубы вводят оправку.

Волочению (калибровке) подвергают также горячекатаные металлические прутки круглого, шестигранного, квадратного и других профилей. Такие калиброванные прутки, носящие название холодноотянутого сортового материала, используют главным образом для изготовления из них деталей на токарных автоматах.

Прессование металлов

Прессовáние (от лат. *presso* — давлý, жмý) — процесс обработки материалов давлением, производимый с целью увеличения плотности, изменения формы, разделения фаз материала, для изменения механических или иных его свойств.

Как правило, для прессования применяют прессы высокого давления. Прессование используют в различных отраслях промышленности, а также в сельском хозяйстве.

Прессование следует отличать отковки и штамповки.

Сущность прессования состоит в выдавливании металла из замкнутой полости матрицы через отверстие, соответствующее сечению прессуемого профиля. Исходным материалом являются слитки или прокат из цветных металлов и сплавов (*Al, Cu, Pb и др.*) и специально подготовленные стальные заготовки.

Процесс прессования проводят при температуре горячей обработки давлением на гидравлических прессах. Существует прямой и обратный методы прессования. При обратном прессовании отход металла (пресс-остаток) уменьшается до $5\div 6\%$ (прямой — $18\div 20\%$) и снижаются усилия прессования на $25\div 30\%$. Однако обратный метод ограничен из-за сложной конструкции пресса.

Процесс деформации при прессовании характеризуется коэффициентом вытяжки $\mu = 8 \div 50$ и более и степенью обжатия ε до 90%. Схема всестороннего сжатия при прессовании приводит к высоким удельным усилиям и износу инструмента. Для уменьшения их применяют различные смазки (графит, жидкое стекло и др.). Основными достоинствами прессования являются высокая точность профилей и производительность процесса.

§ VI.5. Способы обработки резанием, инструменты и станки

Обработка металлов резанием представляет собой технологическую операцию или комплекс операций над заготовкой с целью получения детали необходимых конфигурации, размеров и параметров. Обработка резанием выполняется на заготовках из черных и цветных металлов, обладающих определенными физико-механическими свойствами. Для обработки заготовки применяют разные виды резания. Выбор конкретного зависит от свойств заготовки, конфигурации будущей детали и типа операции, которую необходимо выполнить. Только правильно подобранные способы позволят получить изделие с необходимыми характеристиками [12].

Сущность и назначение процесса резания металлов

Процесс резания – взаимодействие режущего инструмента с заготовкой, при этом отделяется слой материала в виде стружки или металлической пыли. Операции осуществляют следующими способами:

1. Лезвийным. Выполняется с помощью плашек, сверл, резцов, метчиков, фрез и т. д. на металлорежущих станках соответствующего типа.
2. Абразивным. Здесь задействованы шлифовальные круги, шкурки, пасты и др. материалы. Операции выполняются вручную или с помощью специального станочного оборудования, предназначенного для таких целей.

3. С применением специальных сред физико-химического типа. К ним относят плазменную, лазерную, электролитическую и др. виды обработки металла.

Резание металлов – это процесс сложный, он представляет собой последовательное деформирование и разрушение срезаемого материала. Удаляемый слой металла превращается в стружку, при этом принято различать тип стружки:

- сливная (образуется при резании металлов, относящихся к пластичным);
- скалывающаяся (при резании металлов средней твердости);
- надломленная (при обработке металлов, склонных к охрупчиванию).

На вид стружки влияние оказывает не только обрабатываемый металл, но и применяемый инструмент, его геометрия, условия и режим резания, а также квалификация станочника.

Виды резания разные, технология проведения работ зависит от технологического процесса, а качество – от применяемого инструмента и квалификации станочника.

Методы обработки выбираются в зависимости от конструктивных показателей, которые предъявляются к детали. Операции могут выполняться с помощью одного конкретного рабочего органа, а в некоторых случаях понадобится их комбинация.

VI.5.1. Применяемое оборудование и инструменты для резания

Как было отмечено, оборудование отличается по типу применяемого металлорежущего инструмента. Выпускается оно в большом ассортименте российскими и зарубежными компаниями, подбирают его в зависимости от вида работ, которые планируют выполнять. Многие из них являются универсальными, т. е. предназначены для выполнения ряда разного типа операций [13].

При работе на металлорежущих станках используют метчики, сверла, развертки, резцы, долбежки, плашки, инструмент фасонного типа и др.

Правильный подбор режущего инструмента имеет значение. От технических характеристик зависит производительность труда, качество выпускаемой продукции и срок эксплуатации. К рабочей поверхности предъявляются требования, которые включают в себя прочностные свойства, способность не изнашиваться и поддаваться повторной или многократной заточке, выдерживать нагрев.

Инструмент для обработки металлов резанием используют не только компании, выпускающие продукцию разного назначения, но и любители мастерить своими руками.

Инструмент для выполнения резательных операций на машиностроительных станках состоит из рабочей части (в некоторых случаях совмещается с калибрующей) и присоединительной. Первая часть выполняет режущие операции. Она срезает припуск или выполняет отверстия. Может иметь один или несколько режущих элементов включая разные по назначению и форме (рис. VI.9).



Рис. VI.9. Конструктивные элементы режущего инструмента

От геометрических характеристик режущей части зависит точность изготовления детали. Указывается в паспортных данных на конкретный вид.

Присоединительная часть рабочего органа может быть цельной, сборной или комбинированной. Это зависит от материала, из которого он изготовлен, и его характеристик. Комбинированные и составные режущие инструменты, как правило, изготавливают с целью понижения стоимости на приобретение.

Заготовки из металла поступают на обработку резанием с определенной величиной припуска. Он представляет собой тот слой, вернее, его величину, которая будет удалена в процессе совершения операции выбранным методом обработки. Обычно устанавливается в конструкторской документации. Для снятия совершают установочные и вспомогательные движения рабочим органом металлорежущего станка. Установочные действия выполняют для закрепления рабочего органа по отношению к металлической заготовке, а с помощью вспомогательных двигают его.

Обработку резанием выполняют на специальном машиностроительном оборудовании [14,15,16]:

Сверление

Сверлением на станках сверлильного типа. Применяется для получения отверстий сквозных и глухих необходимого диаметра с помощью сверл: центровочных, перовых, спиральных и т. д. (рис. VI.10). Рабочие движения делят на 2 вида: главное и подачи. Осуществляя первый вид, выполняют снятие стружки, а вторым передвигают инструмент обработки вдоль оси.



Рис. VI.10. Процесс сверления

На *сверлильных станках* получают сквозные и глухие отверстия в деталях, а также увеличивают размеры предварительно полученных отверстий или нарезают в них внутреннюю резьбу (*рис. VI.11*).



Рис. VI.11. Сверлильный станок

Точение

Точением на одноименных станках поверхностей цилиндрических, конических, торцевых наружных и внутренних. Заготовка при этом совершает вращательное движение, резец снимает припуск за один или несколько проходов [16].

На *токарных станках* обрабатывают наружные, внутренние и торцевые поверхности заготовок, а также производят резку заготовок на части (*рис. VI.12*).



Рис. VI.12. Токарный станок

Станочная обработка резанием является основным способом обеспечения высокой точности и чистоты обработки поверхности деталей. При осуществлении этого процесса с поверхности заготовки режущим инструментом срезается слой металла в виде стружки для получения необходимой геометрической формы и размеров изделия. Чтобы удалить с заготовки слой металла, режущему инструменту и заготовке необходимо сообщить взаимное относительное перемещение. Инструмент и заготовку устанавливают и закрепляют в рабочих органах (шпиндель, стол, револьверная головка) металлорежущих станков, обеспечивающих такое перемещение. На токарно-фрезерных станках выполняют сверление, зенкерование, развертывание и растачивание отверстий, обтачивание наружных цилиндрических поверхностей резцом, подрезание торцов, нарезание резьбы и фрезерование плоскостей (*рис. VI.13*).

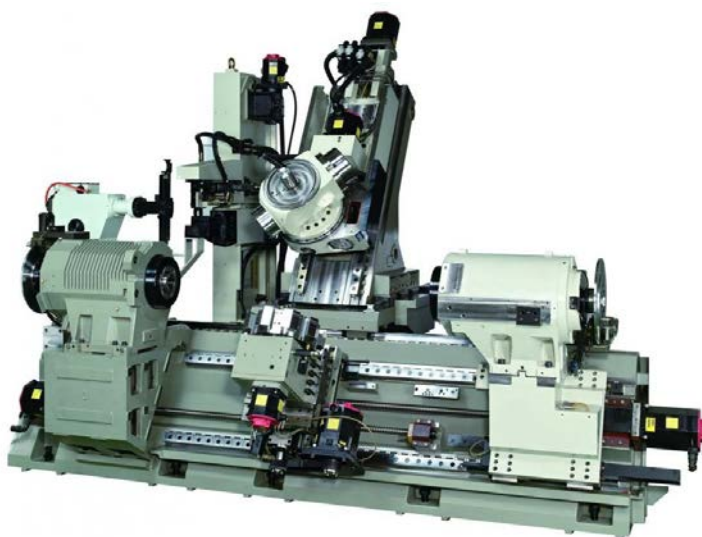


Рис. VI.13. Токарно-фрезерный станок с ЧПУ

Фрезерование

Фрезерование осуществляют с помощью с помощью фрез. В этом случае заготовка закрепляется на станке неподвижно и может двигаться только в продольном направлении. Рабочий орган совершает вращательное движение. На *фрезерных станках* (рис. VI.14) обрабатывают горизонтальные, вертикальные и наклонные плоскости, фасонные поверхности, уступы и пазы различного профиля с помощью многолезвийного режущего инструмента - фрезы.

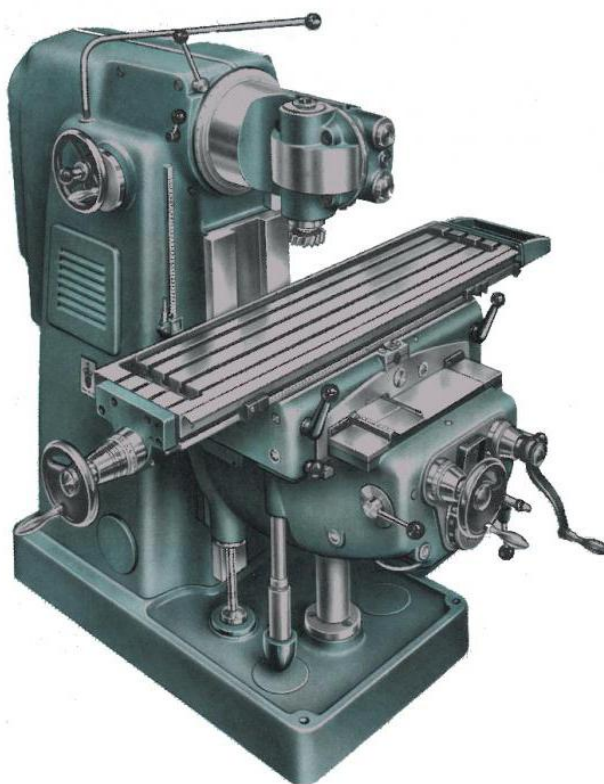


Рис. VI.14. Фрезерный станок

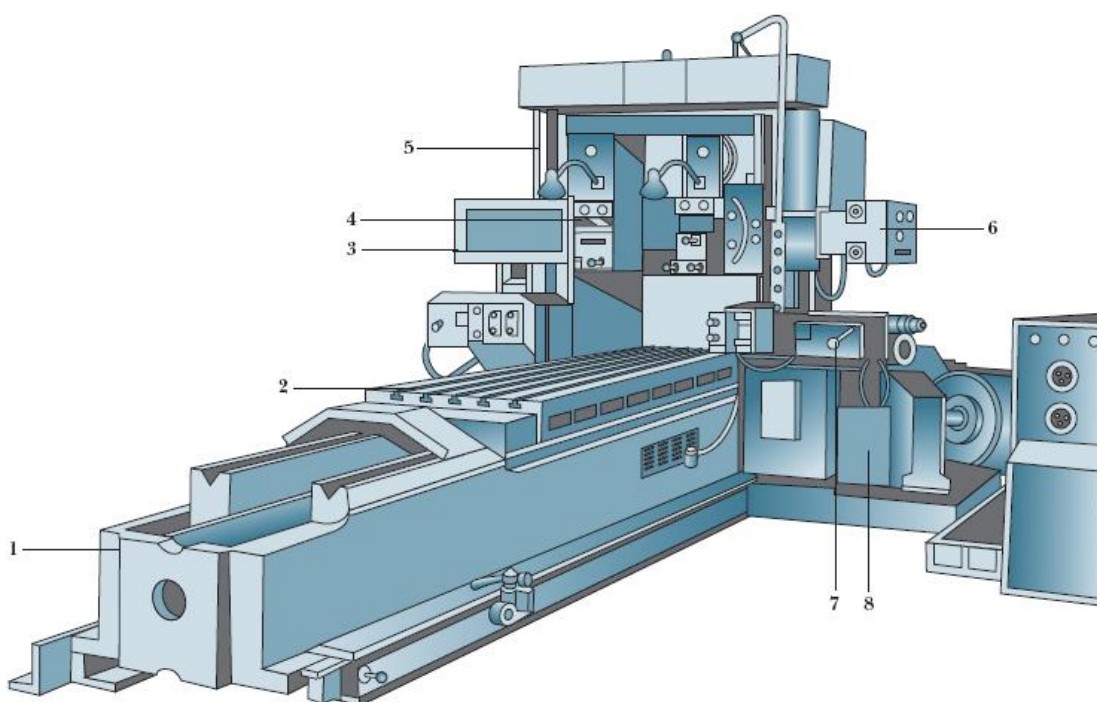
Общим недостатком различных способов обработки резанием можно отнести значительные отходы материала в виде стружки.

Строгание

Строгание осуществляют на специальных станках: поперечно- (рис. VI.15), продольно- (рис. VI.16), вертикально-строгальных, или как их часто называют – долбежных (рис. VI.17). При этом применяют резцы как изогнутые, так и прямые.



Рис. VI.15. Внешний вид поперечно-строгального станка 7305Т



*Рис. VI.16. Схема продольно-строгального станка:
1-направляющие станины; 2-стол; 3-поперечина; 4-вертикальные суппорты; 5-стойки портала; 6-коробка
подач; 7-каретка бокового суппорта; 8-привод*

Вертикальное строгание осуществляют на специальном станке, который и называется долбежным. Для выполнения операции необходим резец соответствующей конструкции. Он в процессе выполнения операции совершает возвратно-поступательный тип прямолинейного движения.



Рис. VI.17. Станок (вертикально-строгальный) долбежный ГД 200 (Казахстан)

Шлифование

Шлифование осуществляют с помощью специального круга, который совершает обороты с определенной скоростью. Таким способом можно получить деталь с необходимой степенью шероховатости и чистоты, которые могут достигать долей миллиметра (рис. VI.18; VI.19; VI.20).



Рис. VI.18. Плоско шлифовальный станок горизонтальный (ZIERSCH & BALTRUSH)



Рис. VI.19. Плоско шлифовальный станок горизонтальный



*Рис. VI.20. Станок для шлифования и полирования
цилиндрических изделий сложной формы
(TOS-BHU_32)*

VI.5.2. Оборудование для горячей и холодной обработки металлов давлением ***Молоты***

К молотам относятся кузнечно-штамповочные машины ударного действия, в которых энергия привода перед ударом преобразуется в кинетическую энергию линейного движения рабочих масс с закрепленными

на них штампами, а во время удара – в полезную работу деформирования поковки. Для привода молотов различных конструкций используют пар (в устаревших конструкциях), сжатый воздух или газ, жидкость под давлением, горючую смесь, взрывчатые вещества, электромагнитное и гравитационное поле.

По технологическому признаку молоты разделяют *на ковочные* (для свободной ковки), *штамповочные* (для объемной штамповки) и *листоштамповочные* (для штамповки листовых материалов).

Принцип действия молотов заключается в разгоне рабочих масс до скорости, обеспечивающей накопление кинетической энергии, которая называется эффективной энергией молота, и использования ее для деформирования поковки ударом во время рабочего хода. Ударный характер деформирования благоприятен для многопереходной горячей объемной штамповки массивных и тонких изделий, таких как слесарномонтажный и медицинский инструмент из стали и трудно деформируемых сплавов. Исполнительным звеном служит ударная масса («баба») с закрепленным на ней бойком или штампом. «Баба», *штамп*, *шток* и *поршень* рабочего цилиндра образуют массу рабочих частей. Скорость рабочих частей при ударе $5...9$ м/с, частота ударов – $60...80$ мин⁻¹. Для снижения уровня вибраций, возникающих при ударе молоты устанавливают на виброизолированных фундаментах.

Молоты по кратности действия энергоносителя разделяются на группы *простого* и *двойного действия*.

У молотов *простого действия* движение вниз происходит под действием силы тяжести рабочих частей. Работа силы тяжести переходит в кинетическую энергию, используемую для деформирования поковки. Возвратный ход (подъем) рабочих частей осуществляется гибкими связями (канат, цепь) или пневматическими и гидравлическими цилиндрами.

У молотов *двойного действия* движение вниз осуществляется под действием двух факторов: силы тяжести рабочих частей и энергии, воздуха

связью ударных масс разработан ВНИИМетмаш и изготовлен ЗАО НКМЗ. Впоследствии конструкция модернизирована и обеспечивает энергию удара до 250 кДж.

Прессы

Устройства для производства высокого давления для уплотнения какого-либо вещества, выжимания жидкостей, изменения формы изделий, подъема и перемещения тяжестей. По конструкции прессы делят на четыре типа: *клиновые; винтовые; рычажные; гидравлические*.

Гидравлический пресс - это машина для обработки материалов давлением, приводимая в действие жидкостью, находящейся под высоким давлением. Впервые *гидравлические прессы* были применены в конце 18 - начале 19 вв. для пакетирования сена, выдавливания виноградного сока, отжима масла и т.п. С середины XIX века *гидравлические прессы* широко используются в металлообработке: дляковки слитков, листовой штамповки, гибки и правки, объёмной штамповки, выдавливания труб и профилей, пакетирования и брикетирования отходов, прессования порошковых материалов, покрытия кабелей металлической оболочкой и др. *Гидравлические прессы* нашли распространение также в производстве пластмассовых и резиновых изделий, древесностружечных плит, фанеры, текстолита и др. Они применяются при синтезе новых материалов (например, искусственных алмазов).

Действие гидравлического пресса основано на законе Паскаля. Усилие возникает на поршне рабочего цилиндра, в который под высоким давлением поступает жидкость (вода или масло). Поршень связан с рабочим инструментом. Гидравлический пресс может иметь привод от насоса, насосно-аккумуляторной станции, парового, воздушного, гидравлического или электромеханического мультипликатора. Рабочие цилиндры располагаются горизонтально или вертикально (*рис. VI.22*).

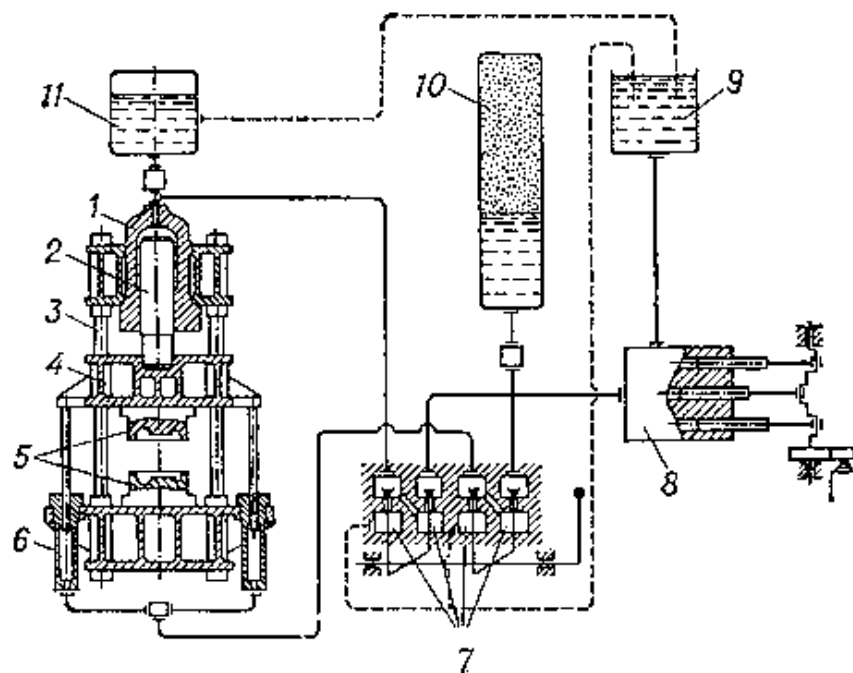


Рис. VI.22. Принципиальная схема гидравлического пресса:

1 — рабочий цилиндр; 2 — плунжер (поршень); 3 — станина; 4 — подвижная поперечина; 5 — инструмент (штамп); 6 — цилиндр обратного хода; 7 — клапаны управления; 8 — насос; 9 — сливной бак; 10 — воздушно-гидравлический аккумулятор; 11 — наполнительный бак

Давление рабочей жидкости для большинства гидравлических прессов составляет $20 \div 32 \text{ Мн/м}^2$ ($200 \div 320 \text{ кгс/см}^2$), достигая в отдельных случаях (для синтеза алмазов) 450 Мн/м^2 (4500 кгс/см^2) (рис. VI.23).



Рис. VI.23. 200 тонный вертикальный гидравлический пресс

Гидравлический пресс не требует тяжёлого фундамента и не производит больших сотрясений и шума, что неизбежно при работе молота.

Наиболее мощные гидравлические прессы для объёмной штамповки построены в 60-х гг. в СССР и развивают усилие 735 МН [14].

Стоимость обработки металла на *гидравлическом прессе* ниже, чем при обработке на молотах, а *к.п.д.* выше.

Одна из самых востребованных моделей сегодня - это *гидравлический горизонтальный пресс HC30*, используемый при работе с существенными объемами мусора и отходов в условиях маленькой площади (*рис. VI.24*).



Рис. VI.24. Гидравлический горизонтальный пресс HC30

Данный горизонтальный пресс привлекателен тем, что он не занимает лишних квадратных метров. *НС30* применяется на складах, а также на производстве, где требуется быстрое и автоматизированное оснащение для прессования отходов. При этом загрузка может осуществляться без перерыва, а кипы формируются в автоматическом режиме.

Прокатные станы

По назначению прокатные станы подразделяют на:

- станы для производства полупродукта;
- станы для выпуска готового продукта.

К первой группе относят *обжимные станы* для прокатки слитков в полупродукт крупного сечения (*блюминги*, дающие заготовку для сортового проката, и *слябинги*, дающие заготовку для листового проката) и *заготовочные* для получения полупродукта более мелкого сечения.

Ко второй группе относят сортовые, листовые, трубные и специальные станы.

Размер блюмингов, слябингов, заготовочных и сортовых станов характеризуются диаметром бочки валков (например, блюминг 1500; сортовой стан 350); размер сортовых станов – длиной бочки (например, стан 3600), а размер трубопрокатных станов – наружным диаметром прокатываемых труб (*рис. VI.25; VI.26; VI.27*).



Рис. VI.25. Прокатный стан (блюминг) дающий заготовку для сортового проката



Рис. VI.26. Прокатный стан дающий прямоугольную заготовку (сляб)



Рис. VI.27. Заготовительный стан 500

Инструмент и оборудование для прокатки

Инструментов для прокатки являются *валки*, которые в зависимости от прокатываемого профиля могут быть гладкими, применяемые для прокатки листов, лент и т.п., ступенчатыми, например, для прокатки полосовой стали, и *ручьевыми* для получения сортового проката. *Ручьём* называют вырез на боковой поверхности валка, а совокупность двух *ручьёв* образует *калибр*. Прокатные станы могут быть одноклетьевые и многоклетьевые. Комплект прокатных валков со станиной называю *рабочей клетью* (рис. VI.28)..

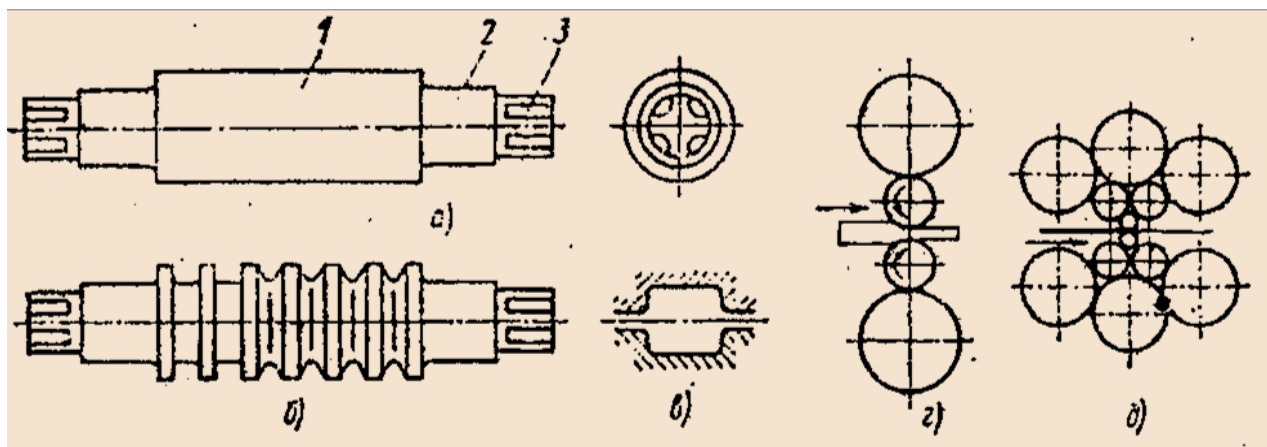


Рис. VI.28. Инструмент для прокатки:

а) – гладкий валок; б) – ручьевого валок; в) – калибр; г) – расположение валков в четырёхвалковой клетки; д) – то же в 12-валковой клетки.

Рабочие клетки по числу и расположению валков могут быть двухвалковые, четырёхвалковые и многовалковые, у которых также два вала рабочих, остальные – опорные.

Использование опорных валков позволяет применять рабочие валки малого диаметра, благодаря чему увеличивается вытяжка и снижается усилия деформирования.

§ VI.6. Характеристика способов сварки и схематизация сварочных процессов

Сварка

Сварку применяют не только как способ соединения деталей, но и как технологический способ изготовления самих деталей. Использование сварки позволило создавать сварно-литые и ковано-сварные изделия. В некоторых случаях сварка полностью заменила литье и ковку, что позволило повысить производительность и улучшить условия труда, а также обеспечить высокую экономическую эффективность производства.

Для изготовления сварных деталей не требуется моделей, форм или штампов. Это значительно снижает их стоимость при единичном и мелкосерийном производстве. По сравнению с литьем сварка менее трудоемкий процесс, обеспечивающий значительную экономию металла за

счет уменьшения толщины элементов конструкций (толщина стенок литых деталей в $2\div 3$ раза больше, чем у сварных) и припусков на механическую обработку. Масса сварных узлов по сравнению с литыми уменьшается на $30\div 50\%$.

Снижение трудоемкости процесса сварки обусловлено отсутствием таких операций, как изготовление моделей отливок, стержней и литейных форм. Применение сварки наиболее целесообразно при изготовлении узлов сложной формы, отдельные детали которых получают с помощью прокатки,ковки, штамповки или литья.

Сварные детали и узлы разного назначения используют в энергетическом, металлургическом и транспортном оборудовании, аппаратах химической промышленности и т.п. (рис. VI.29) [17].

Сварка таких изделий, как зубчатые колеса или коленчатые валы, позволяет изготавливать их более ответственные части (зубчатый венец, шейка) из высокопрочных сталей, а менее ответственные (диск и ступица колеса, щека коленчатого вала) - из менее прочных и дешевых материалов.

Нахлесточные соединения многих конструкций ранее получали с помощью клепки.

Сварка во многих случаях вытеснила клепку и стала основным технологическим процессом получения современных конструкций и сооружений. К достоинствам сварных конструкций перед клепаными относятся: экономия металла, электроэнергии и труда; сокращение сроков изготовления; снижение массы изделий; возможность наносить слой металла со специальными свойствами, обеспечивающими износостойкость, коррозионную стойкость, жаропрочность и др.

К недостаткам относятся пониженная долговечность сварных конструкций при вибрационных и знакопеременных рабочих нагрузках, а также невозможность получения надежных сварных соединений из некоторых разнородных металлов. В этих случаях до сих пор оправдано применение клепаных конструкций (например, в авиации).

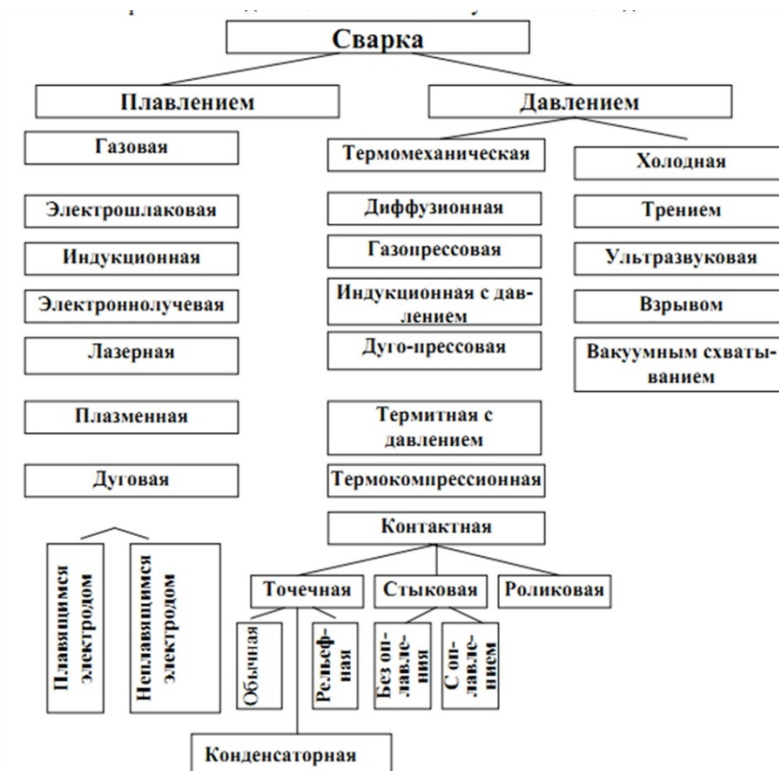


Рис. VI.29. Классификация способов сварки

Сплавление и сдавливание

Большинство сварочных работ предполагают использование электрической дуги. Она разогревает контактную зону до состояния плавления, происходящего на ограниченной площади. Сам процесс сваривания металла под термическим воздействием называется электродуговым.

Самый проверенный и надёжный способ соединения стальных заготовок в быту и на производстве – их сплавление с использованием специального сварочного оборудования (рис. VI.30) [18]. К этой же категории работ относится и сварка листового металла под воздействием предельно допустимых для данного материала температур. Однако сплавление стали и других материалов со схожей структурой не ограничивается одной лишь электродуговой сваркой. Существуют другие виды сварочных работ, которые различаться по целому ряду технических и методических признаков.



Рис. VI.30. Электродуговая сварка

Способы сварки металлических заготовок в самом общем виде подразумевают либо их обычное сплавление, либо получение специфического соединения, реализуемого под воздействием повышенного давления.

К первой из этих методик может быть отнесена и пайка металла, при которой расплавлению подлежит лишь присадочный материал, а сами соединяемые заготовки остаются в целостности.

При соединении металлов или других материалов по второму из указанных способов (без использования эффекта оплавления) для объединения заготовок применяется фактор высокого давления. Все остальные признаки указанного процесса (температура в зоне стыка и другие параметры) учитываются лишь как второстепенные.

Энергия воздействия

По типу энергии воздействия, благодаря которой образуется требуемое сварное соединение, все виды сварки металлов делятся на следующие категории:

- термическая обработка, предполагающая оплавление места стыка с выделением большого количества тепловой энергии;

- термомеханическая сварка, осуществляемая за счёт внешнего давления с использованием элементов нагрева электросваркой;
- и, наконец, чисто механическая (обработка под давлением).

Согласно первой методике свариваемые заготовки подлежат расплавлению, после чего они образуют так называемую «сварочную ванну».

По завершении работ (после затвердевания) на месте ванны остаётся сварной шов, металл в котором имеет литую структуру.

К разновидностям термических сварочных работ по металлу следует отнести газовую, электрошлаковую, дуговую, лазерную, плазменную, термитную (химическую) и подобные им виды сварки.

При газовом способе сваривания металлов и сплавов рабочая смесь подаётся на специальную горелку от двух баллонов, содержащих горючий состав и кислород. При этом качество пламени горелки регулируется соответствующими вентилями подачи обеих составляющих. Помимо этого к месту сварки подаётся особый присадочный материал, обеспечивающий получение качественного шва.

В случае химической или термитной обработки металлов рабочая зона формируется под воздействием теплоты, выделяемой при сгорании компонентов специальной порошковой смеси (термита). Отметим также, что на практике наиболее распространены термитные составы на основе обычного алюминия.

Термомеханической обработка места стыка включает в себя диффузионную, контактную, а также газопрессовую сварочные методики. Принцип так называемой «сварки под давлением» интуитивно понятен, хотя технологии сварочных работ по металлу могут отличаться.

Защита в зоне сваривания

Известные разновидности сварочных процедур могут классифицироваться и по способу защиты металла в зоне сварки. Согласно этому признаку все они подразделяются на следующие виды: обработка в

воздушной среде; сварка в вакууме; сплавление в среде защитных газов (аргона или углекислого газа); сочленение под слоем флюса.

Кроме того, по временным показателям течения процесса сварка железа и металлов бывает непрерывной или прерывистой, а по уровню автоматизации она может быть ручной, механизированной или же автоматической (полуавтоматической).

Сварочное оборудование и особенности его применения

Оборудование для проведения сварочных работ по металлу выбирается с учётом стоящей перед исполнителем задачи, а также условий проведения соответствующих операций. При этом возможные подходы к степени механизации варьируются от ручной сварки до полностью автоматизированного процесса. В качестве промежуточных вариантов могут рассматриваться сварка полуавтоматом или же с помощью электронного инвертора. Рассмотрим каждый из указанных способов реализации поставленных задач и соответствующее ему оборудование более подробно.

ММА-сварка

Обычное ручное дуговое сплавление (по международной классификации – ММА) является самым старым видом сварки, осуществляемым с использованием штучных покрытых стержневых электродов (рис. VI.31).



Рис. VI.31. Ручное дуговое сплавление

Такой подход к выполнению сварочных операций наиболее эффективен при обработке нержавеющей и насыщенных углеродом сталей, а также чёрных металлов. Довольно часто этот вариант используется при проведении ремонтных и обслуживающих работ, предполагающих сваривание сплавов железа.

К преимуществам *ММА-сварки* следует отнести высокую мобильность используемого оборудования (обычного трансформатора), что объясняется возможностью выбора требуемой длины электрических кабелей.

Благодаря этому обстоятельству аппарат для сварки может свободно перемещаться по всей строительной площадке. А большой ассортимент используемых при этом покрытых электродов позволяет работать практически со всеми видами заготовок из чёрного металла (включая листовое железо).

К недостаткам этого способа, прежде всего, следует отнести сложность образования сварных швов, что чаще всего доступно лишь профессиональным сварщикам. Сюда же следует добавить обилие отходов и относительно низкий КПД производимых работ.

Особенности *ММА-сварки* в том, что при реализации этого метода через свариваемые заготовки и электроды для сварки пропускается переменный или постоянный электрический ток невысокого напряжения. Выбор вида тока при этом варианте сплавления зависит от марки свариваемых сплавов.

Переменный ток обычно используется при работе с высокоуглеродистыми и чёрными сталями, а постоянный больше подходит для сварки нержавеющей стали.

Образующаяся при этом дуга расплавляет специальное покрытие электродного стержня, остатки которого оседают в виде капель в сварочную ванну. В ней эти капли перемешиваются с частицами расплавленного металла заготовок, а получившийся при этом шлак всплывает на поверхность.

После того, как сварочный ток отключен – формирующий сварочную ванну металл постепенно кристаллизуется, в результате чего на месте стыка получается шов. На поверхности этого шва затвердевший шлак образует корку из отходов сварки, которая впоследствии отбивается специальным молотком.

Аргонно-дуговая сварка

Отличительная черта данного способа сваривания – присутствие в рабочей зоне подвижного электрода в виде плавящейся проволоки и подача в неё защитного (инертного) газа.

Защита дуги посредством специально подаваемого в зону сварки газа препятствует взаимодействию расплавляемого металла с окружающим воздухом. Необходимость в этом объясняется тем, что указанное взаимодействие приводит к образованию на поверхности шва слоя из оксидов и нитритов, заметно снижающих его качество).

Со схемой организации сварки аргоном можно ознакомиться на (рис. VI.32).



Рис. VI.32. Оборудование для аргонно-дуговой сварки

В процессе сваривания подвижная проволока по направляющим роликам с постоянной скоростью подаётся в газовое сопло, где она расплавляется под действием высокотемпературной электрической дуги.

При этом способе сварочных работ организации подачи присадки обеспечивается постоянство её размера. Полуавтоматическим этот метод называется потому, что скорость и направление ведения электрода, как правило, выбираются вручную.

Сварка полуавтоматом

Сварить заготовки в режиме полуавтомата можно и без применения специальной газовой защиты. В этом случае используется так называемая «порошковая» проволока, включающая в свой состав ряд компонентов, образующих при сгорании требуемую защитную среду (рис. VI.33).

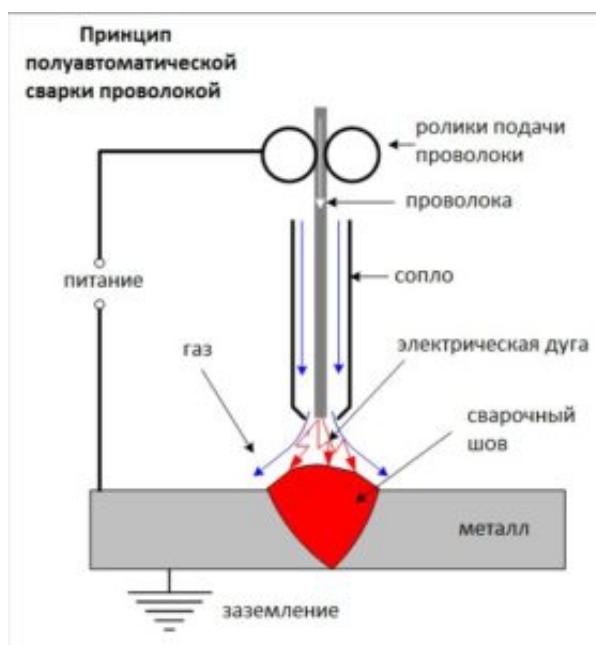


Рис. VI.33. Схемой полуавтоматической сварки

Особенности применения инверторов

Инверторный метод сваривания заготовок из металла предполагает использование специального оборудования, посредством которого устанавливается требуемый режим рабочей дуги.

При сварке металла инвертором оператор частично освобождается от ряда ручных манипуляций и получает большую свободу действий. В этом случае важно правильно выбрать рабочий ток, зависящий от таких факторов, как диаметр используемого электрода, тип образуемого соединения и угол, под которым ведётся сварка.

К особенностям работы с таким оборудованием следует отнести важность выбора нужной полярности подключения сварочного аппарата к электродному стержню и самой детали. От этого фактора зависит, что будет сильнее прогреваться в процессе сварки – сама заготовка или электрод. Соответственно этому выбирается толщина металла, который предполагается обрабатывать в каждом конкретном случае.

Так, прямая полярность (минус подключён к электроду) позволяет обрабатывать заготовки металла толщиной от трёх миллиметров и более. Обратным током (плюс на электроде) пользуются при сварке тонкого металла с целью снижения рисков его прожога.

Полярность подключения при сварке инвертором обычно указывается на упаковке с электродами, рассчитанными на работу с этим оборудованием.

Автоматы для сварки

И, наконец, так называемый «сварочный автомат» обеспечивает получение устойчивой дуги, формируемой под слоем специального порошка (флюса) (рис. VI.34).



Рис. VI.34. Сварочный автомат

Сущность этого процесса заключается в автоматическом её поддержании в специально созданной среде, называемой сварочной ванной.

С учётом специфики автоматического процесса дуга сгорает внутри расплавленной зоны, в которой давление металла достигает 9 грамм на сантиметр квадратный. За счёт этого, сплавляемый материал надёжно удерживается в пределах ванны и практически не разбрызгивается.

Указанным способом можно организовать сварку металла в домашних условиях (при необходимости обработки заготовок небольшой толщины). Подобно инверторному способу в этом случае важно правильно выбрать режим сваривания деталей, определяемый значениями заданных токовых параметров.

§ VI.7. Технология изготовления деталей методом порошковой металлургии

Порошковая металлургия — технология получения металлических порошков и изготовления изделий из них (или их композиций с неметаллическими порошками). В общем виде технологический процесс порошковой металлургии состоит из четырёх основных этапов: (1) производство порошков, (2) смешивание порошков, (3) уплотнение (прессование, брикетирование), (4) спекание.

Применяется как экономически выгодная замена механической обработки при массовом производстве. Технология позволяет получить высокоточные изделия.

Также применяется для достижения особых свойств или заданных характеристик, которые невозможно получить каким-либо другим методом.

Порошковая металлургия должна рассматриваться в качестве возможного метода производства любой детали, при подходящей геометрии и большом объеме производства [20÷27].

Производство порошка – первая технологическая операция метода порошковой металлургии. Способы получения порошков весьма разнообразны, что позволяет широко варьировать их свойства. Это, в свою

очередь, делает возможным придание изделиям из порошка требуемых физических, механических и других специальных свойств. Кроме того, метод изготовления порошка в значительной мере определяет его качество и себестоимость.

VI.7.1. Получение порошка исходного материала

Существует несколько способов получения металлических порошков. Физические, химические и технологические свойства порошков, форма частиц зависит от способа их производства.

Механические методы обеспечивают превращение исходного материала в порошок без заметного изменения его химического состава.

Чаще всего используют измельчение твердых материалов в мельницах различных конструкций и диспергирование расплавов (*рис. VI.35; VI.36*).

К физико-химическим методам относят технологические процессы производства порошков, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья.

В результате получаемый порошок по химическому составу существенно отличается от исходного материала.

Вот основные промышленные способы изготовления металлических порошков:

1. Механическое измельчение металлов в вихревых, вибрационных и шаровых мельницах.
2. Распыление расплавов (жидких металлов) сжатым воздухом или в среде инертных газов. Метод появился в 60-х годах. Его достоинства — возможность эффективной очистки расплава от многих примесей, высокая производительность и экономичность процесса.
3. Восстановление руды или окалины. Наиболее экономичный метод. Почти половину всего порошка железа получают восстановлением руды.
4. Электролитический метод.

Использование сильного тока приложенного к стержню металла в вакууме. Применяется для производства порошкового алюминия.

В промышленных условиях специальные порошки получают также осаждением, науглероживанием, термической диссоциацией летучих соединений (карбонильный метод) и другими способами.



Рис. VI.35. Шаровая мельница барабанного типа с электроприводом

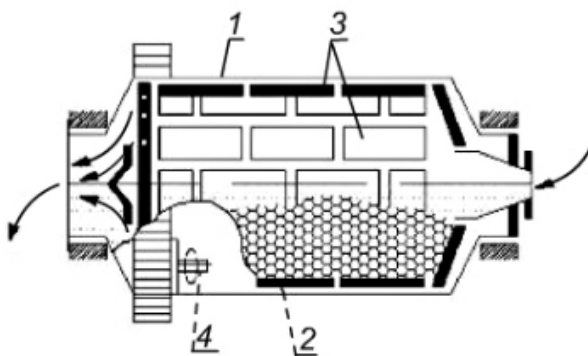


Рис. VI.36. Принцип действия шаровой мельницы барабанного типа:
1-кожух барабана; 2-размольные шары; 3-плиты для футеровки; 4-электропривод.

Свойства порошков

Порошки металлов различаются по своим физико-химическим и технологическим свойствам.

К категории физических свойств относятся форморазмеры и гранулометрический состав частиц, характеристики их удельной

поверхности, а также плотность (пикнометрическая/насыпная) и способность деформироваться, именуемая микротвердостью.

Набор химических свойств определяется химическим составом сырья и метода/способа изготовления. Допустимая концентрация в готовой порошковой продукции нежелательных примесей не должна превышать значения $1,5 \div 2\%$.

Одним из важнейших химических свойств является степень газонасыщенности порошка, что особенно актуально для порошков, получаемых путем восстановления, из состава которых бывает трудно удалить определенную часть газообразных восстановителей и продуктов реакции. В электролитических порошках может содержаться некоторая доля катодного водорода. В составе порошков карбонильного генеза могут в растворенном состоянии находиться O_2 , CO , CO_2 и другие газы, по мере увеличения процентного содержания которых возрастает степень хрупкости порошка, что затрудняет процесс формовки из них заготовок будущих изделий.

К категории химических причисляют и такие свойства порошков, как степень *токсичности* и *пирофорности*. Большинство металлических порошков *токсично*, причем степень токсичности тем ниже, чем меньшие размеры имеют частицы. Под *пирофорностью* понимают способность порошков некоторых активных самовоспламеняться вплоть до взрыва при контакте с кислородом воздуха. Любые работы с такими порошками необходимо проводить в рамках строжайшего соблюдения мер безопасности.

К технологическим свойствам порошков относят показатели их *текучести*, *прессуемости* и *формуемости*.

Предварительная подготовка порошковой смеси

Преобразование уже изготовленного металлического порошка в конечные изделия начинается с предварительной подготовки исходной смеси

(*шихты*), которая в последующем будет подвергаться формованию и спеканию.

Процесс подготовки исходной *шихты* является трехэтапным и последовательно осуществляется в виде:

- отжига;
- сортирования по фракциям (классификации);
- непосредственно смешивания.

Рекристаллизационный отжиг порошков необходим для повышения показателей их пластичности и прессуемости. Путем отжига удается восстановить остаточные оксиды и удалить внутреннее напряжение – наклеп.

Для отжига порошки подвергают нагреву в восстановительно-защитных газовых или вакуумных средах в диапазоне температур от 0,45 до 0,65 от абсолютного значения T° плавления того металла, из которого они состоят. Так, отжиг порошка *Си* осуществляют в восстановительном потоке инертных газов при T° от 360 до 420 $^\circ\text{C}$, а порошка *Fe* – при T° от 660 до 770 $^\circ\text{C}$. Обычно отжигу подвергают порошки, изготавливаемые способами механоизмельчения, электролиза и термокарбонильной диссоциации.

Классификацию порошков осуществляют их разделением по фракциям (в зависимости от тех или иных размерных параметров частиц) с применением специальных вибросит, имеющих ячейки соответствующих диаметров.

Для разделения по фракциям применяют также воздушные сепараторы, а для классификации жидких смесей – способ центробежной дисперсной седиментации (*рис. VI.37*).

Порошковый материал направляется нагнетаемым турбиной воздушным потоком в область разделения, где под действием центробежной силы происходит отделение и оседание тяжелых крупных частиц, удаляемых в нижнем направлении через разгрузочный клапан. Мелкие легкие частицы

увлекаются циклонным потоком воздуха вверх и направляются на дополнительную сепарацию.



Рис. VI.37. Центробежный воздушный сепаратор тонкого разделения CFS/HD-S

Для приготовления порошковой шихты используются фракции, сочетаемые в требуемом процентном соотношении.

Смешивание порошков – важнейшая из подготовительных операций процесса ПМ – производится путем приготовления из *металлопорошков* различного химико-гранулометрического состава (возможны легирующие добавки порошков неметаллических элементов) однородной субстанции – шихты.

От того, насколько тщательно происходит смешивание, зависит однородность шихты, что исключительно важно для конечных функциональных свойств готовой металлокерамической продукции.

Чаще всего смешивание порошковых составляющих осуществляют механическим способом с применением специальных миксерах.

При смешивании с измельчением компонентов весовое соотношение загружаемой порошковой массы и шаровидных размольных элементов должно быть примерно равным (1:1). Смешивание, не сопровождающееся измельчением, выполняют в миксерах непрерывного действия барабанного, шнекового, лопастного, центробежного, планетарного, конусного типа.

Равномерность и быстрота распределения частиц порошковых компонентов в составе смеси будут тем эффективнее, чем ближе друг к другу абсолютные величины их плотности. При существенном расхождении абсолютных величин неизбежно расслоение составляющих. Для предотвращения этого фактора компоненты следует загружать по раздельности в следующей последовательности: в первую очередь наименее плотный, а затем уже все прочие.

Целесообразнее всего проводить смешивание в жидкостных средах, несмотря даже на то, что техпроцесс в этом случае усложняется и является более затратным в экономическом отношении.

При подготовке шихты из высокотвердых компонентов (W , Mo , карбиды металлов) с целью повысить их *формуемость* в смешиваемую субстанцию нередко добавляют тяжелые спирты, бензин, глицерин, а также дистиллированную воду.

Иногда для облегчения смешивания и последующего прессования осуществляют введение в смесь технологических присадок-пластификаторов на парафиново-стеариновой и глицериновой основе, а также летучих веществ, позволяющих изготавливать продукты требуемой степени пористости.

При этом необходимо, чтобы пластификаторы соответствовали следующим критериям:

- высокая смачивающая способность;
- полное выгорание при нагревании;
- возможность быстрого удаления растворителями органической группы.

Раствор пластификаторов обычно заливается в перемешиваемую порошковую субстанцию, а по завершении процесса получаемая шихта тщательно высушивается и просеивается.

VI.7.2. Формование металлических порошков

Формование (формовка) в порошковой металлургии – это технологическая стадия, целью которой является уплотнение поступающего в пресс-форму заданного количества готовой сыпучей шихты и ее обжатие для придания форморазмеров готового к последующему спеканию изделия.

Этап формования заключается в преобразовании полученной сыпучей шихты в достаточно прочные первичные заготовки пористой структуры. На результаты формования порошка влияют его насыпная масса, способы предварительной обработки, сила и направленность формовочного давления, ряд других факторов.

Деформация частиц при формовке по своему генезу может быть одновременно упругой, хрупкой и пластической. На *рис. VI.38* представлены некоторые виды перемещения частиц при формовке.

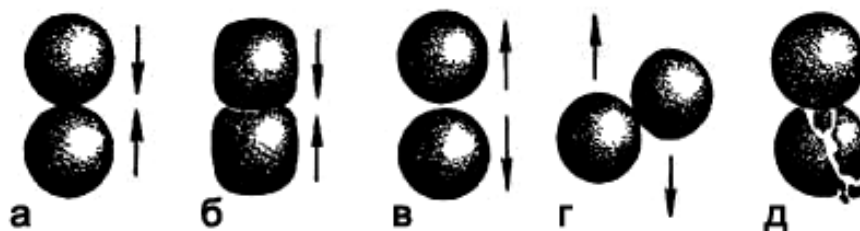


Рис. VI.38. Виды перемещения частиц порошков в ходе формования.

Как видим, сближение частиц может сопровождаться увеличением площади контакта, не сопровождаясь (а) или сопровождаясь (б) их деформацией; при удалении частиц (в) площадь контакта уменьшается вплоть до его прерывания; при взаимоскольжении частиц (г) точка контакта смещается; в ходе перемещения частиц может возникать происходить хрупкая деформация, приводящая к их разрушению (д).

На *рис. VI.39* представлена схема методов формования.



Рис. VI.39. Схема методов формования металлических порошков

Наиболее востребованными являются способы формовки путем прессования в стальных пресс-формах, гидростатического, мундштучного и динамического формования, а также прокатки и шликерного литья.

Холодная формовка в жестких пресс-формах

Формовка шихты в большинстве случаев осуществляется путем ее размещения в прочных стальных пресс-формах и последующего спрессовывания под давлением от 30 до 1200 МПа на прессовых агрегатах механического, пневматического или гидравлического принципа действия.

Формование порошка данным способом осуществляется поэтапно (рис. VI.40).

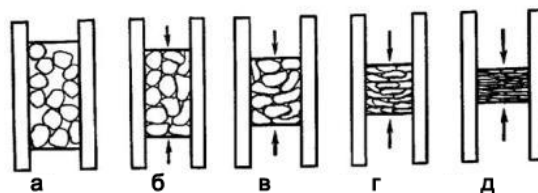


Рис. VI.40. Этапы формовки

Сразу после засыпки шихты наблюдается хаотичное размещение ее частиц по всему объему пресс-формы, с образованием т. наз. мостиков или арок (а). При внешнем давлении, по мере его повышения, частицы порошка,

уплотняясь, заполняют пустоты, вследствие чего происходит разрушение мостиков и арок (б,в). На последующих стадиях спрессовывания наблюдается дальнейшее уплотнение частиц, сопровождаемое изменением границ между ними, что приводит к увеличению степени прочности заготовки (г). На конечном этапе процесса хрупкие частицы твердометаллических порошков разрушаются, а мягкометаллические частицы претерпевают пластическую деформацию (д).

На *рис. VI.41* показаны схема одностороннего прессования и кривая ступенчатого роста плотности по высоте с ее отношением к минимальному диаметру поперечного сечения d : $H/d = 2...3$.

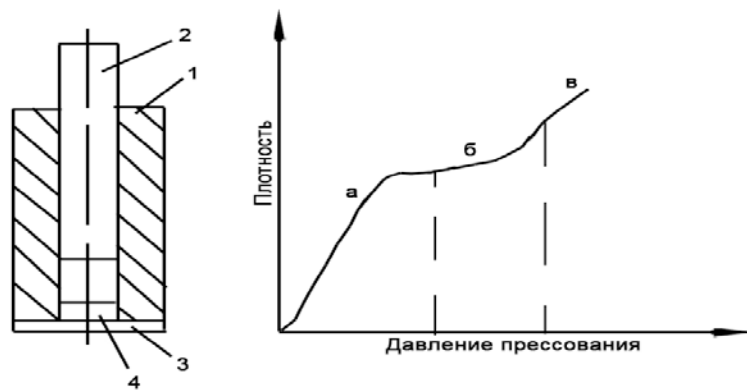


Рис. VI.41. Схема установки для одностороннего прессования и кривая роста ступенчатого плотности по отношению к давлению:
1 – матрица; 2 – пуансон уплотнения; 3 – нижний пуансон; 4 – порошок.

Если данное соотношение превышает 3, не достигая 5, то целесообразно применение двухстороннего прессования (*рис. VI.42*); при еще больших значениях показано использование других способов.

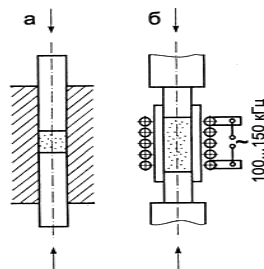


Рис. VI.42. Схема установки, осуществляющей двустороннее прессование порошковых материалов:
а – без нагрева, б – с нагревом.

Формовка изделий сложной конфигурации сопряжена с определенными трудностями, препятствующими обеспечению одинаковой плотности в тех или иных сечениях. С целью разрешения проблемы используют установки с несколькими пуансонами, что обеспечивает возможность прилагать к порошку различные усилия (рис. VI.43).

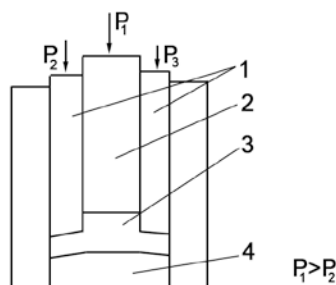


Рис. VI.43. Схема формования изделий сложной конфигурации:
1- пуансон, 2-пуансон, 3-матрица, 4- нижний пуансон

Формование в пресс-формах выполняется на прессовых агрегатах механогидравлического типа. Формовка заготовок со сложной конфигурацией осуществляется на прессах, оснащенных несколькими плунжерами.

Гидростатическое формование

При данном способе формовки для создания усилия сжатия используется жидкость, чем обусловлено его название. Процесс спрессовывания осуществляют путем сжатия шихты по всем направлениям. При формовании гидростатическим способом (рис. VI.44) порошок предварительно засыпается в эластичный контейнер и подвергается вакуумированию, герметизируется и лишь после этого помещается в цилиндр с рабочей жидкостью, давление в котором поднимается до необходимых значений.

Поскольку трение между стенками контейнера и частицами шихты оказывается предельно минимальным, плотность спрессованной заготовки равномерно распределяется по каждому из сечений.

Преимущество способа гидростатического формования заключается еще и в том, что при нем исключается анизотропия свойств – их внутренняя неравномерность и разнонаправленность.

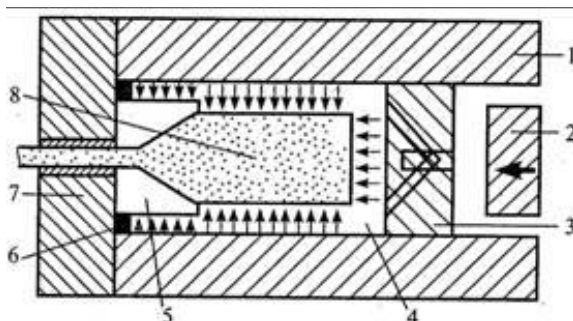


Рис. VI.44. Схема установки для гидростатического формования:

1 – рабочий цилиндр; 2 – пуансон; 3 – пресс-шайба; 4 – рабочая жидкость; 5 – матрица; 6 – уплотнитель; 7 – держатель матрицы; 8 – контейнер с шихтой

Прокатка порошковой шихты

Формование прокаткой порошков осуществляется на прокатных станах. Порошок может поступать в валки, как показано на рис. VI.45, либо под воздействием силы тяжести (вертикальная свободная подача), либо в принудительном режиме (шнековая подача).

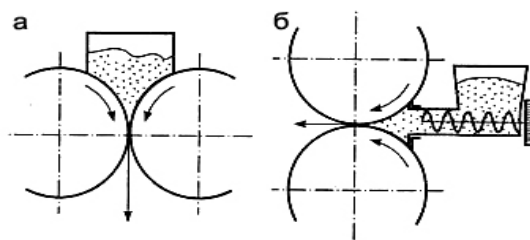


Рис. VI.45. Вертикальная (а) и горизонтально-шнековая (б) подача материала

Процесс прокатки является непрерывным и осуществляется в автоматическом режиме, что обеспечивает его высокую производительность.

Мундштучное формование

Способ заключается в формовании заготовок из шихты в смеси с пластификатором путем пропускания сквозь технологическое отверстие в матрице-фильере, по форме напоминающей мундштук. Практикуется формовка способом мундштучного прессования равноплотных изделий

значительной длины (прутков, труб, уголков, швеллеров и т. п.) из труднопрессуемых порошков *W*, *Mo*, *Th*, *Be* и др.

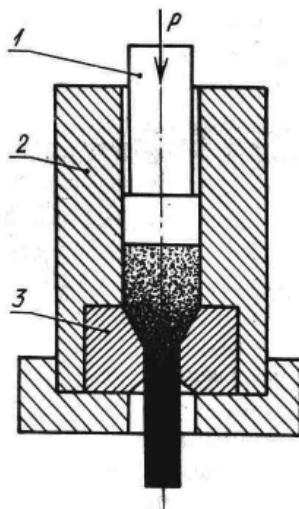


Рис. VI.46. Принцип мундштучной формовки

На рисунке VI.46 представлен принцип мундштучной формовки, состоящий в выдавливании в пресс-форму помещенной в контейнер (2) пластифицированной шихты пуансоном (1) через отверстие матричного мундштука (3).

В настоящее время в сфере порошковой металлургии для формовки металлокерамических заготовок широко применяют способ инжекционного формования, известный также как литье под давлением. Сущность способа сходна с принципом мундштучного прессования, только в данном случае через фильеру инжектора (мундштука) в пресс-форму впрыскивается не пластифицированный порошок, а его расплав.

Шликерное формование

Шликерным способом осуществляется формовка изделий сложной конфигурации. Его сущность состоит в том, что шликер в виде насыщенной однородной суспензии из порошковой шихты и технологической жидкости заливается в пористую форму-матрицу (рис. VI.47).

В корпусе матрицы (1) размещается сердечник (2), закрепленный узлами взаимной соосной установки (3). На одном из этих закреплен подпиточная емкость (4) с контролирующим устройством, через которую

промежуток между матрицей и сердечником заполняется *шликерной суспензией*.

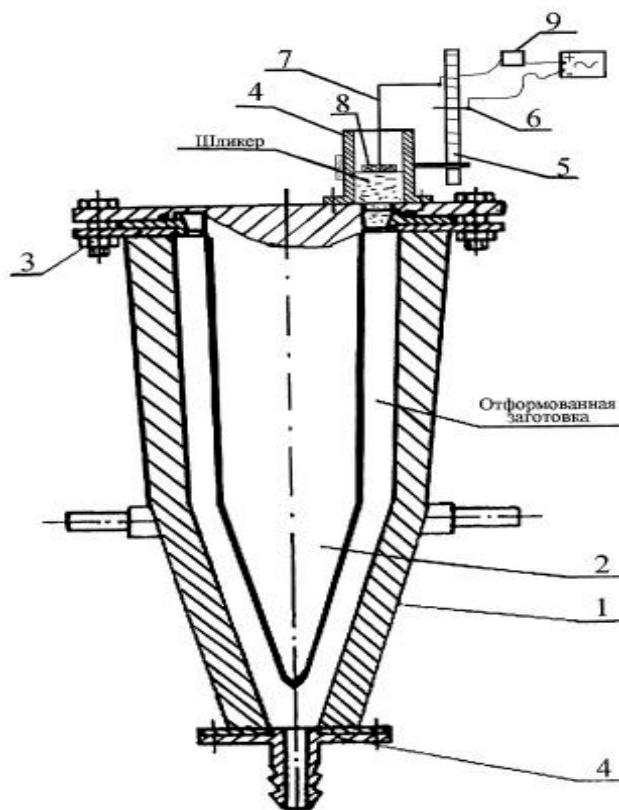


Рис. VI.47. Схема установки для шликерного формования

Поступление *шликера* из подпиточного узла до необходимых пределов осуществляется за счет контроля высоты между неподвижным нижним контактом (6) и выставляемом по линейке (5) подвижным верхним контактом (7), жестко связанным с поплавком поплавковой камеры (8), при превышении уровня включающим сигнализационный блок (9).

По заполнении *шликером* жидкость частично впитывается матрицей и окончательно удаляется путем нагревания до температуры кипения. Сформованные же заготовки подвергают сушке на открытом воздухе или в специальных сушильных шкафах.

Динамическое формование

Динамическим формованием называют процесс формовки заготовок путем приложения значительных нагрузок в импульсном режиме. В качестве этой целью могут быть использованы следующие источники энергии.

Механическая вибрация (рис. VI.48).

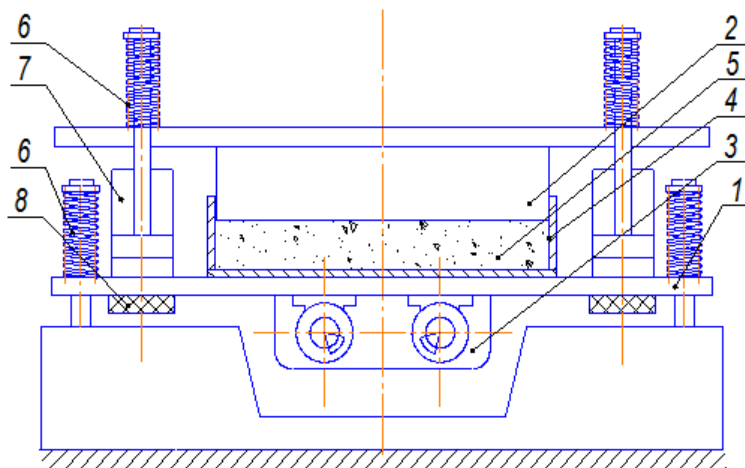


Рис. VI.48. Схема действия установки для виброударного формования

Под воздействием насаженных на валы электродвигателей эксцентриков (3) подпружиненная прижимными пружинами (6) подвижная опорная площадка (1) вибрирует, передавая ударные импульсы закрепленной на ней подвижной матричной пресс-форме (4) с засыпанной в нее шихтой (5), уплотняемой статичным пуансоном (2). При этом сила ударов амортизируется гидроцилиндрами (7) с подпружиненными штоками, а также закрепленными на обращенной к фундаменту поверхности опорной площадки упругими прокладками (8).

Сила взрыва (рис. VI.49).

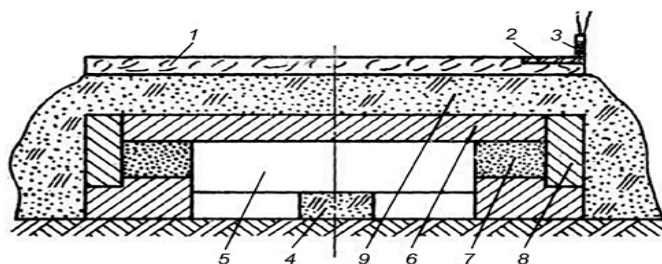


Рис. VI.49. Схема процесса формования взрывом

При срабатывании электродетонатора (3), вставленного в специальное монтажное устройство (2), происходит взрыв заряда ВВ (1), импульс от которого через слой выполняющей функцию пресс-формы песчано-шлаковой засыпки (9) равномерно распределяется по всей площади пуансона (6), уплотняющего помещенную в матрицу (8) формуемую шихту (7) до заданных

параметров, определяемых высотой установленного на подставку (4) ограничительного внутреннего стержня (5).

Другие способы вибрационных воздействий, включая использование энергопотенциала сжатого газа, электроразряда, магнитного поля. Высокая частота нагрузочных импульсов обеспечивает требуемую плотность и прочность изделий. Другими достоинствами способа являются снижение показателей упругой деформации, а также экономичность ввиду минимизации расходов на технологическое оборудование.

VI.7.3. Спекание и доводка заготовок

Финишная стадия технологическая метода ПМ – термическая обработка сформованных заготовок методом спекания с целью достижения требуемых свойств. Максимального эффекта при спекании заготовок из монометаллических порошков можно достичь при их нагревании до температуры, составляющей $72 \div 92\% T^\circ$ плавления металла. Заготовки из многокомпонентных твердых сплавов на металлокарбидной основе подвергают *спеканию* в температурном диапазоне, близком к T° плавления связующего компонента. При этом, во избежание оксидации заготовки рекомендуется помещать в защитную инертногазовую или восстановительную водородно/углеводородную газовую среду, либо в вакуумную камеру.

Спекание – одна из наиболее ответственных технологических процедур в рамках метода ПМ, в результате которой малопрочные заготовки преобразуются в исключительно прочные спеченные тела, приближающиеся по своим свойствам к аналогам, изготавливаемым методом горячего литья, а часто и превосходящими их по этой и целому ряду других функциональных характеристик. В ходе *спекания* из заготовки удаляются адсорбированные в них газы, возгоняются нежелательные примеси, снимаются остаточные напряжения в частицах и точках контакта между ними, устраняются

оксидные пленки, происходит диффузионное преобразование поверхностного слоя, качественно преобразуется форма пор.

В завершение процесса может быть реализован ряд дополнительных отделочных операций, включая обработку резанием, калибрование, нитроцементацию, диффузионное хромирование, нанесение гальванического покрытия и пропитку готовых изделий с тем, чтобы добиться требуемой точности заданных габаритных параметров, повысить степень прочности и класс поверхностной чистоты.

Спекание осуществляют двумя способами: твердофазным (по мере нагрева заготовок не образуется жидкий расплав одного из компонентов), и жидкофазным (в ходе повышения T° нагрева поликомпонентных заготовок наиболее легкоплавкий компонент начинает вступать в жидкое агрегатное состояние – плавиться. Весьма распространенным является также способ горячего формования, объединяющий в себе процессы прессования и спекания.

Способ твердофазного спекания

Твердофазное спекание применяют для изготовления промышленных продуктов на основе моно- или поликомпонентных систем, которые при нагревании могут вести себя по-разному в зависимости от генеза и химического состава соответствующих компонентов.

Этап твердофазного спекания сопровождается рядом сопутствующих процессов.

1. По мере повышения температуры нагрева энергетический потенциал и амплитудные колебания атомов в кристаллической решетке металлических порошковых тел заметно возрастают вплоть до непрерывной смены взаимного месторасположения, известной как диффузия. Которая, в свою очередь, может носить как поверхностный, так и общеобъемный характер (поверхностная диффузия и объемная диффузия).

2. Усадка в ходе твердофазного спекания проявляется в изменении как линейных, так и объемных параметров спекаемых тел (линейная и объемная усадка). Кинетический потенциал процесса усадки спекания возникает в результате того, что при нагреве система постоянно стремится избавиться от запаса поверхностной энергии.

3. Рекристаллизационный отжиг, сопровождаемый ростом величины зерен, проводится, в частности, при изготовлении магнитомягких материалов, которые должны иметь крупнозернистую структуру. В ходе рекристаллизации происходит значительное укрупнение зерен. Поэтому, во избежание ущерба для механических свойств получаемых изделий, режим отжига для обеспечения желаемой зернистости необходимо строго контролировать с использованием диаграмм рекристаллизации (*рис. VI.50*), показывающих зависимость размеров зерен от параметров температура/степень деформации.

4. Перенос атомов газовой средой имеет вид перехода поверхностного слоя вещества при определенных температурах в газообразное (парообразное) агрегатное состояние с его испарением с поверхности одних частиц и последующим конденсационным осаждением на поверхности других. За счет такого переноса происходит усиление межчастичных связей, что способствует требуемому изменению формы пор.

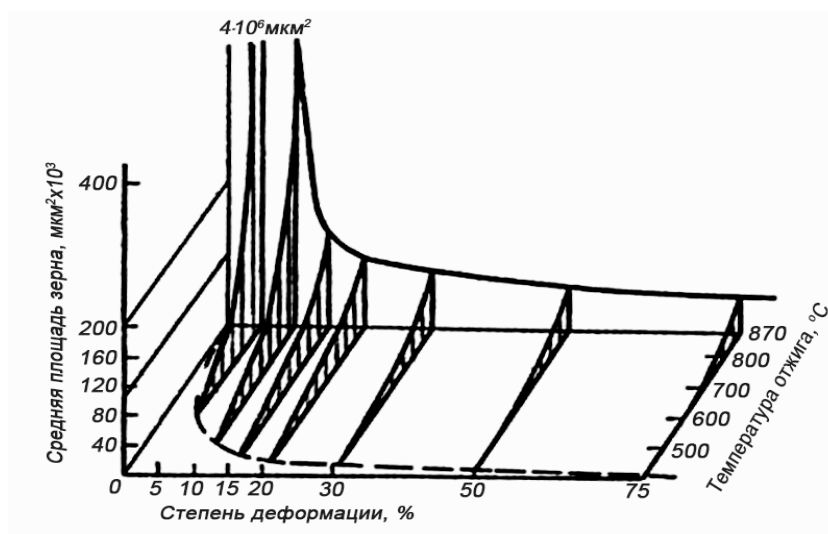


Рис. VI.50. Диаграмма рекристаллизации при отжиге

Жидкофазное спекание

При этом способе спекания происходит расплавление наиболее легкоплавкого компонента сформованной многокомпонентной порошковой заготовки – его расплав и образует жидкую фазу, смачивающую частицы нерасплавившихся твердых составляющих. Кроме того, наличие жидкой фазы способствует интенсификации диффузии и облегчению процесса взаимозамещения частиц. Недостаточная смачиваемость препятствует уплотнению. В точках контакта зерен возможно растворение твердой фазы в жидкой, что улучшает массоперенос. Существуют системы, компоненты которых:

- не являются взаиморастворимыми;
- ограниченно взаиморастворимы;
- взаиморастворимы в значительной степени.

Горячее формование

Когда формовка заготовки из многокомпонентной шихты проводится с ее нагревом до высоких температур, и температура нагрева при этом достигает температуры плавления основного компонента, в это же время происходит спекание заготовки. Способ одновременного формования и спекания называют горячим формованием (горячим прессованием).

Важнейшие преимущества горячего формования состоят в скорейшем уплотнении получаемого данным способом готового изделия и минимизации его пористости при относительно невысоких показателях применяемого давления. Характер уплотнения при горячем формовании тот же, что и при спекании другими способами.

Готовую продукцию, полученную из подвергаемых горячему формованию заготовок, от аналогичных изделий, изготавливаемых при отдельном применении формовки и спекания выгодно отличает мелкозернистая структура, повышенный предел текучести и более высокая

твердость, лучшие показатели электропроводимости и большая точность размеров.

Горячее формование осуществляют с использованием термостойких стальных, графитовых и кремниеграфитовых пресс-форм, характеризующихся высокой механической прочностью. В последние годы все более востребованными для этой цели становятся еще более функциональные пресс-формы из жаропрочных оксидных и силикатных материалов. Пресс-формы с помещенной в них шихтой могут быть нагреты одним из способов, представленных на *рис. VI.51*:

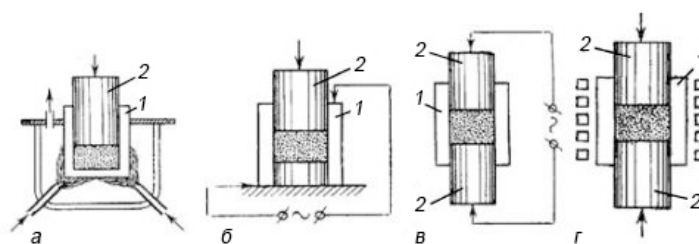


Рис. VI.51. Способы нагрева пресс-форм с шихтой при горячем формовании:

а – способ наружного нагрева; *б* – способ электронагрева пресс-формы; *в* – способ электронагрева шихты; *г* – способ высокочастотного индукционного нагрева (1- матрица, 2 – пуансон)

Для горячего формования в современных условиях применяют многофункциональные автоматические агрегаты на основе гидравлических прессов и совмещенных с ними вакуумных камер с возможностью регулировки температурного режима (*рис. VI.52*).

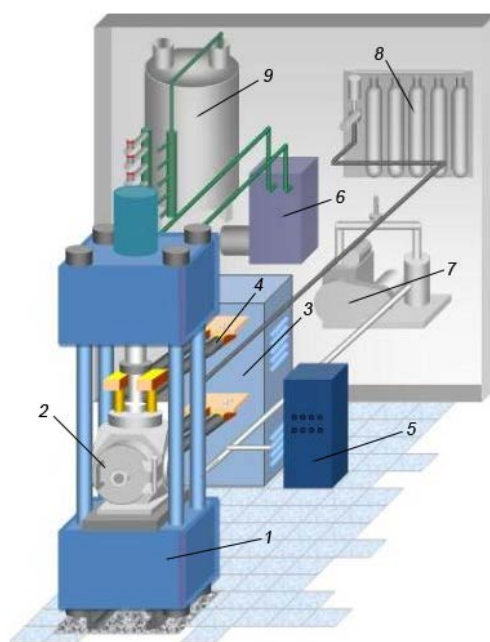


Рис. VI.52. Агрегат для горячего формования

Основные узлы агрегата – это непосредственно гидропресс (1) и вакуум-камера (2), соединенная с обеспечивающим нагрев пресс-формы источником электропитания (3) посредством гибких медных токоподводов с жидкостным охлаждением (4). Включенный в состав агрегатного комплекса электрораспределительный шкаф позволяет обеспечивать функцию регулирования мощности и осуществлять управление всеми устройствами (5). Функционирование пресса осуществляется при помощи гидроагрегата (6).

Создание разреженной среды в вакуум-камере обеспечивает специальная система вакуумирования (7). Контроль параметров среды внутри камеры осуществляет система газоснабжения (8). Система жидкостного охлаждения (9) призвана остужать источник питания, стенки вакуум-камеры, гибкие токоподводы и медные башмаки.

Сам технологический процесс происходит в следующей операционной последовательности. Предварительно скомпактированные заготовки изделий из порошковой шихты помещаются в пресс-форму, заполняемую после этого создающим упруго-сжимаемую среду порошком из специального графита (рис. VI.53).

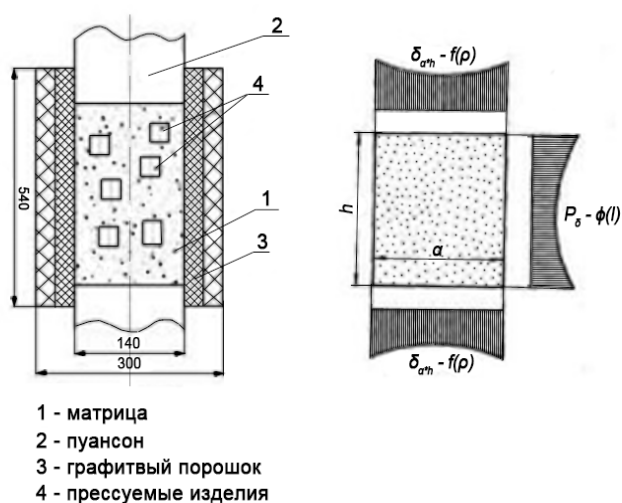


Рис. VI.53. Пресс-форма для горячего формования (а); схема распределения давления при прессовании (б).

Затем пресс-форма в сборе заключается в вакуум-камеру. В ходе горячего формования плунжеры агрегата воздействуют на пуансоны, передающие, в свою очередь, давление на заготовки через графитовый порошковый наполнитель.

Если внутри пресс-формы разместить межслойные промежуточные прокладки, произойдет увеличение производительности установки (рис. VI.54).

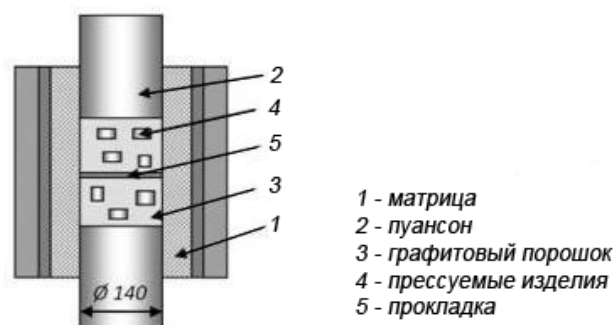


Рис. VI.54. Пресс-форма для горячего формования, оснащенная промежуточной прокладкой.

Дополнительные операции

Применение дополнительных технологических операций практикуют как при необходимости обеспечить высшие классы точности и чистовой обработки поверхности готовых металлокерамических изделий (механическая обработка, калибровка), так и с целью оптимизации их химических свойств (химико-термическая обработка и различные пропитки).

1. При механической обработке (резанием, шлифованием, полированием и т.д.) возникают трудности, обусловленные пористой структурой обрабатываемого материала. Рабочие элементы инструмента (резцы, фрезы, абразивные диски) подвергаются разрушительному воздействию микроударов, вызывающих потребность в частой заточке или замене. Поэтому обработку осуществляют с применением твердосплавного инструмента и кругов из особо твердых абразивов, вплоть до корундовых и алмазных.

2. Калибрование выполняют путем продавливания спекаемых изделий сквозь имеющие необходимые сечения калибровочные отверстия в пресс-

формах. Возможна калибровка как по одному, так и по ряду параметров. Благодаря калиброванию обеспечивается высокая гладкость поверхности, идеальная точность конфигурационных и размерных параметров, уменьшение пористости.

3. Химико-термическую обработку выполняют для повышения устойчивости изделий к коррозии и износу с применением методов:

- нитроцементации (цианирования) – азотно-углеродном насыщении поверхностного слоя изделий в высокотемпературном режиме для повышения их твердости и стойкости к износу;
- диффузионного хромирования – безэлектролизного насыщения поверхностного слоя металлокерамических изделий с диффузией (взаимозамещением) между атомами хрома и обрабатываемого металла, в результате чего образуется стойкое и эстетичное защитное покрытие;
- нанесения защитных гальванических покрытий методом электролиза и др.

Пористая структура металлокерамики способствует активизации термохимических процессов.

4. Пропитка жидкими металлами. В отношении некоторых металлокерамических материалов применяется дополнительная операция в виде пропитывания спекаемой термостойкой каркасной основы жидким расплавом компонента с меньшей в сравнении с каркасом T° плавления. При этом происходит заполнение образуемым расплавом сообщающихся пор термостойкого каркаса и, как результат, обретение готовым изделием улучшенных эксплуатационных характеристик.

Обилие различных методов порошковой металлургии свидетельствует о востребованности данного способа производства промышленных изделий. Неоспоримым плюсом является возможность получения готовой продукции сложной формы с высокими показателями различных свойств. К недостаткам описываемых технологий можно отнести значительную стоимость и сложность производства.

§ VI.8. Технологии производства изделий из полимерных материалов

VI.8.1. Способы формообразования деталей из полимеров в вязкотекучем состоянии

В настоящее время высокомолекулярные смолы, основу всех полимерных материалов, получают химическим путём в результате полимеризации простых молекул или поликонденсацией разных органических соединений.

Процесс полимеризации осуществляется без выделения побочных продуктов. Путём разрыва двойных, тройных химических связей и соединения молекул в длинные линейные и разветвлённые структуры. Например, этилен ($CH_2=CH_2$) $_n$ при полимеризации образует литейный полиэтилен ($-CH_2.CH_2-$) $_n$.

В результате реакции поликонденсации, в которой участвуют несколько веществ, образуются сложные по составу полимеры с линейным (полиамиды, поликарбонаты) или пространственным строением (фенолоформальдегидные, эпоксидные). При поликонденсации наряду с образующимся полимером выделяются такие побочные продукты, как газ или вода.

Переработка пластмасс в изделия осуществляется одним из следующих способов: *экструзией, литьём под давлением, формованием в прессформах, формованием в штампах, вакуумным и пневматическим формованием, сваркой, склейкой, механической обработкой.*

На выбор способа оказывает влияние вид пластмасс (термореактивные или термопластичные), конфигурация и геометрические размеры изделия, вязкость или текучесть пластмассы и т. д.

Метод получения изделий *экструзионной раздувкой* [29] приведен на *рис. VI.55,а* и *литьём под давлением* [28] на *рис. VI.55,б*.

На гидравлическом прессе устанавливается специальная оснастка: пресс-форма (матрица), пуансон, причем конфигурации пресс-формы и пуансона отвечают форме изделия.



а)
 б)
 Рис. VI.55. Получение изделий из термопластиков

Определенная порция прессматериала закладывается в пресс-форму. В пресс-форме имеются электрические подогреватели, которыми она нагревается до необходимой температуры размягчения прессматериала ($130\div 180^{\circ}\text{C}$). После размягчения материал уплотняется пуансоном и под действием давления заполняет оформляющую полость пресс-формы. При выдержке под давлением и с охлаждением пресс-формы материал затвердевает и извлекается из полости после отвода пуансона в первоначальное положение. Методом прессования получают многочисленные детали из текстолита, гетинакса, асботекстолита и других материалов.

Литье под давлением — метод формования изделий из полимерных материалов, заключающийся в нагревании материала до вязкотекучего состояния и передавливании его в закрытую литьевую форму, где материал

приобретает конфигурацию внутренней полости формы и затвердевает. Этим методом получают изделия массой от нескольких граммов до нескольких килограммов с толщиной стенок $1 \div 20$ мм (чаще $3 \div 6$ мм). Для осуществления *литья под давлением* применяют плунжерные или шнековые литьевые машины (рис. VI.56), на которых устанавливаются литьевые формы различной конструкции (рис. VI.57).

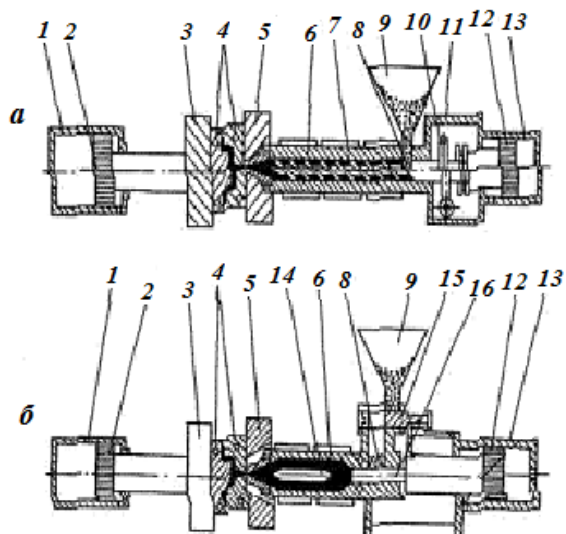


Рис. VI.56. Схема литьевой машины со шнековой (а) и плунжерной (б) пластикацией расплава:

1 — гидроцилиндр механизма смыкания; 2 — поршень гидроцилиндра механизма смыкания; 3 — подвижная плита; 4 — полуформы; 5 — неподвижная плита; 6 — пластикационный цилиндр, 7 — шнек для литье пластмасс под давлением; 8 — загрузочное окно цилиндра пластикации; 9 — бункер; 10 — привод шнека; 11 — корпус гидроцилиндра механизма впрыска; 12 — поршень гидроцилиндра впрыска; 13 — гидроцилиндр шнека; 14 — торпеда — рассекающий поток расплава; 15 — дозатор; 16 — плунжер

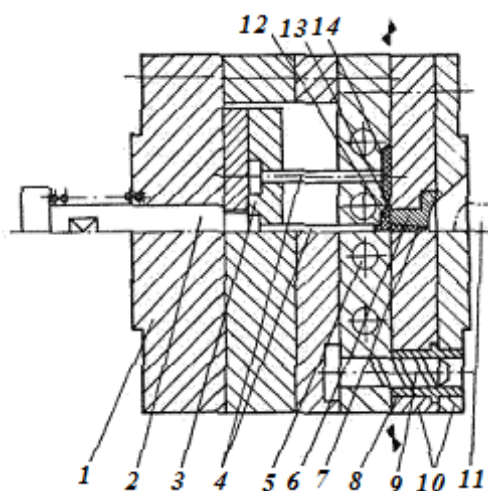


Рис. VI.57. Литьевая форма:

1 — подвижная полуформа; 2 — толкатель; 3 — выталкивающая плита, 4 — выталкиватели; 5 — каналы системы термостатирования формы; 6 — литниковая втулка; 7 — центральный литник; 8 — центрирующая втулка; 9 — центрирующая колонка; 10 — неподвижная полуформа; 11 — сопло литьевой машины; 12 — разводящий литник; 13 — впускной литник; 14 — формообразующая полость

Основными технологическими параметрами процессов *литья под давлением* являются температура расплава T_p , температура формы T_f , давление литья P_l , давление в форме P_f , время выдержки под давлением $t_{внд}$, время охлаждения $t_{охл}$ или время отверждения в форме $t_{отв}$ для термореактивных материалов.

Литьем под давлением (рис. VI.58) перерабатываются как термопластичные, так и термореактивные материалы, но при этом тип материала определяет специфику физико-химических процессов, сопровождающих нагревание и перевод в твердое состояние этих видов пластмасс.

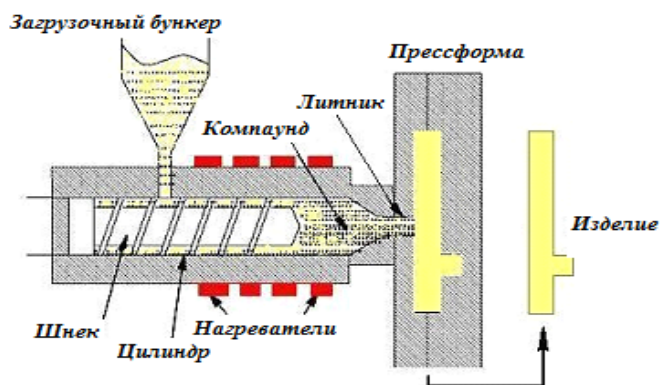


Рис. VI.58. Схема литья под давлением

Технологическая схема процесса приведена на рис. VI.59.

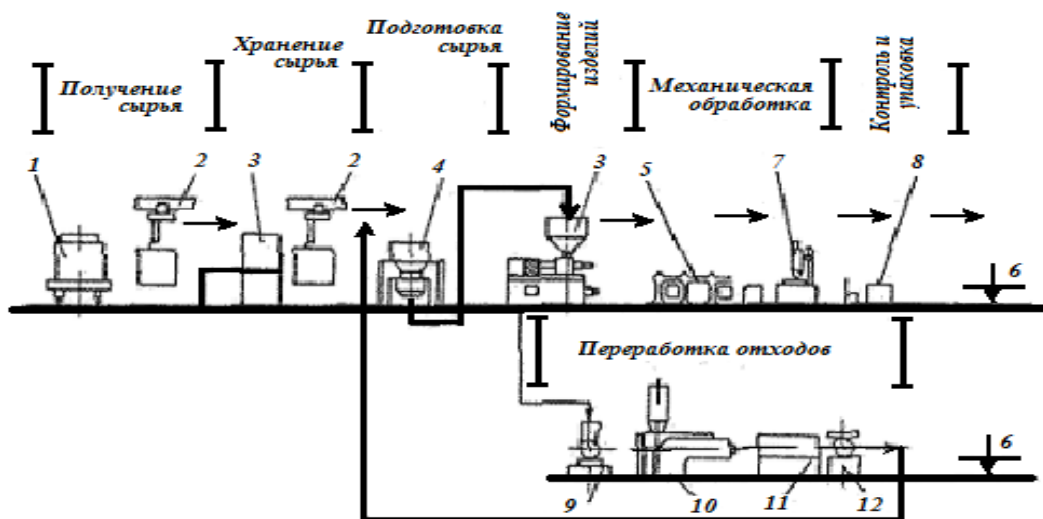


Рис. VI.59. Технологическая схема литья под давлением:

1 — вагон (полувагон, цистерна); 2 — подвесная кран-балка; 3 — склад материала; 4 — вакуумная сушилка; 5 — литьевая машина; 6 — транспортер; 7 — станок механической обработки; 8 — стол упаковки; 9 — дробилка; 10 — экструдер; 11 — охлаждающая ванна; 12 — гранулятор

Анализ процесса литья под давлением может быть проведен по следующим составляющим: перевод материала в вязкопластичное состояние → подача его в зону дозирования → накопление расплава → течение расплава в системе «сопло-форма» → течение расплава в каналах формы и формующей полости → формирование структуры изделия.

Экструзия – способ получения изделий или полуфабрикатов из полимерных материалов неограниченной длины путем выдавливания расплава полимера через формующую головку (фильеру) нужного профиля (рис. VI.60).

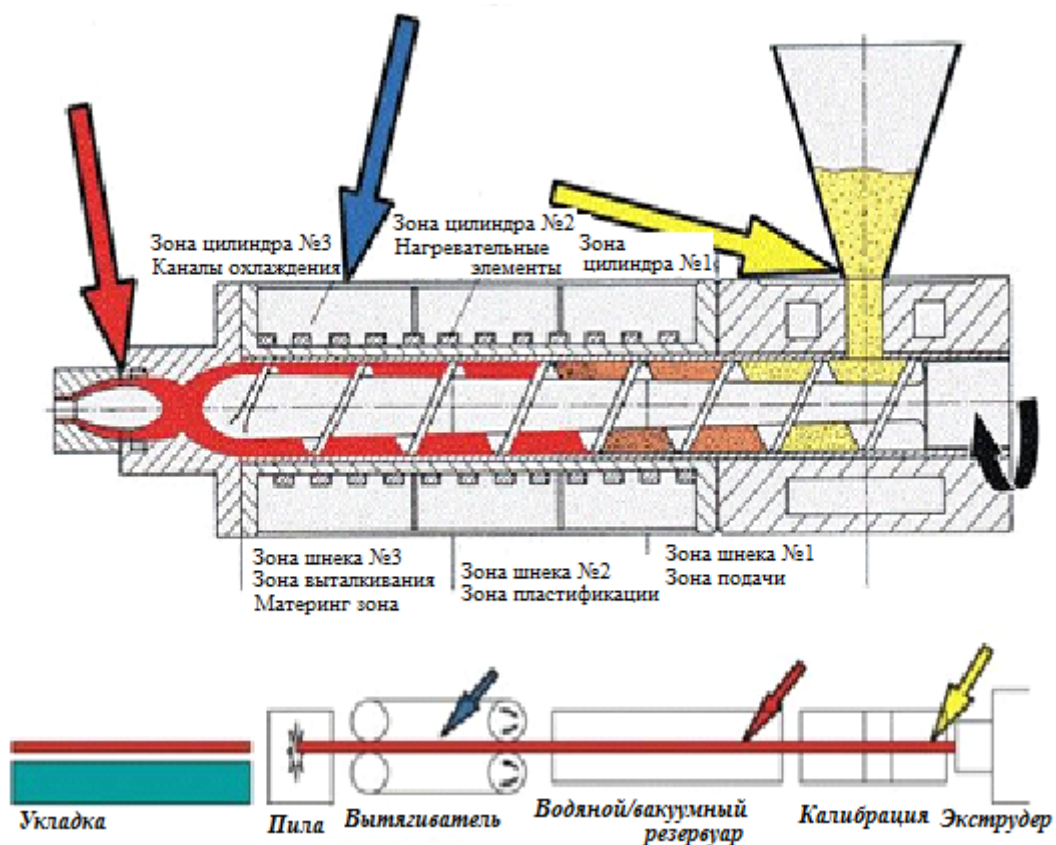


Рис. VI.60. Технология производства труб из полипропилена

Экструзия, наряду с литьем пластмасс под давлением, является одним из самых популярных методов изготовления пластмассовых изделий. Экструзии подвергаются практически все основные типы полимерных материалов, как термопласты, так и реактопласты, а также эластомеры.

В основном для *экструзии* пластмасс применяют *шнековые*, или *червячные*, *экструдеры*. Также существуют *дисковые экструдеры*. Для

успешного производства продукции методом *экструзии* недостаточно только одного экструдера. Кроме него необходимо иметь еще несколько единиц оборудования, вместе составляющих *экструзионную линию*. Кроме того, существуют выдувные экструдеры, которые применяются в установках по получению изделий методом *экструзионно-выдувного формования*.

Устройство экструдеров

Червячные экструдеры подразделяются на *одношнековые*, *двухшнековые* и *многошнековые*.

1. Наиболее простым оборудованием для *экструзии* является *одношнековый* (одночервячный) экструдер без зоны дегазации (рис. VI.61).

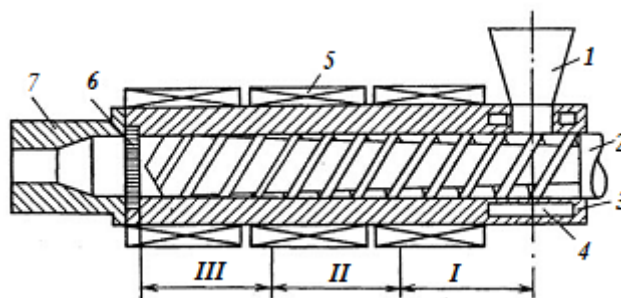


Рис. VI.61. Схема одношнекового экструдера:

1- бункер; 2- червяк (шнек); 3- цилиндр; 4- полость для циркуляции воды; 5- нагреватель; 6- решетка с сетками; 7- формующая головка с адаптером.

Такие *экструдеры* широко применяются для производства пленок, листов, труб, профилей, в качестве одной из составных частей линий-грануляторов и т.д. Основными элементами *экструдера* являются обогреваемый цилиндр, винтовой шнек (с охлаждением или без него), сетки, размещаемые на решетке, и адаптер.

В зависимости от природы полимера, технологических режимов переработки применяются шнеки различного профиля с разным шагом и глубиной витков. В зависимости же от вида выпускаемого изделия применяют либо коротко-, либо длинношнековые машины, т. е. с малым или большим отношением длины L к диаметру D шнека (L/D). Значения D и L/D являются основными характеристиками одношнекового экструдера.

Типоразмерный ряд *экструдеров*, выпускавшихся в Советском Союзе был основан на диаметрах шнека: $D = 20; 32; 45; 63; 90; 125; 160; 200; 250$ и 320 мм.

2. *Двухшнековые экструдеры* могут применяться как в тех же случаях, что и одношнековые, так и в специальных условиях, когда одношнековые экструдеры не справляются с задачами. В российских реалиях *двухшнековые экструдеры* в подавляющем большинстве случаев используются для *экструзии* ПВХ (поливинилхлорида) в изделия строительного назначения.

Технология процесса *экструзии ПВХ* зачастую подразумевает применение порошкообразного основного сырья (*ПВХ-композиции*), которую невозможно переработать на стандартной *одношнековой экструзионной линии*. Как правило, *двухшнековые экструдеры* в обязательном порядке оснащаются устройством дегазации. *Двухшнековые экструдеры* различают двух основных типов:

- *экструдеры* со шнеками, находящимися в зацеплении (с однонаправленным или противоположно направленным вращением шнеков);
- *экструдеры* со шнеками, не находящимися в зацеплении (с однонаправленным или противоположно направленным вращением шнеков).

3. *Многошнековые экструдеры* применяются сравнительно редко. К таким экструдерам можно отнести *четырёхшнековый экструдер*, а также планетарный экструдер. Червячная система последнего состоит из одного центрального червяка и еще, как правило, 6 дополнительных шнеков, расположенного вокруг основного на одинаковом радиальном расстоянии. Эти шнеки называют планетарными, отсюда и название экструдера. Такая конструкция позволяет перерабатывать материалы, склонные к быстрой термической деструкции (часто – композиции ПВХ) без применения высоких температур, но со значительным смесительным эффектом и интенсивной дегазацией расплава.

4. *Дисковые экструдеры* относятся к достаточно редкому типу *экструзионных машин* современности. Работа *дискового экструдера*

основана на перемещении полимерного материала и создании давления за счет адгезии полимера к подвижным частям *экструдера*. Такие *экструдеры* могут быть как *однодисковыми*, так и *многодисковыми*. Последний является наиболее современным вариантом и позволяет давать давление расплава на выходе в несколько раз превышающее давление расплава стандартного *одношнекового экструдера*. Однако, обычно это преимущество нивелируется высокой стоимостью *многодискового экструдера* вследствие его конструкционной сложности.

Формование в штампах применяется для изготовления изделий незамкнутого контура (стекла кабин, обтекателей, козырьков и др.) из *листовых термопластов* (винипласта, органического стекла, полиэтилена). При формовке детали выдерживают в штампах под определенным давлением до температуры $40\div 45^{\circ}\text{C}$. Затем отформованное изделие охлаждается в штампе для фиксации полученной им конфигурации. Для получения поверхности лучшего качества применяют штампы, изготовленные из дерева или песчано-клеевой массы, а рабочие поверхности пуансона и матрицы оклеивают замшей или байкой [30,31].

Вакуумное и пневматическое формование используется для изготовления деталей сложной пространственной формы (колпаков и деталей для оптики и светотехники) из листового термопласта (органического стекла) с достаточно высокими оптическими свойствами, так как во время формования предварительно подогретый материал не скользит по оформляющей поверхности штампа. Роль пуансона или матрицы выполняет упругая среда - атмосферное давление или сжатый воздух. Вакуумное и пневматическое формование применяется также при изготовлении крупногабаритных изделий и из некоторых термореактивных пластмасс с высокопрочными наполнителями (стеклянным волокном, стеклянной тканью).

Реализация методов термоформования достаточно проста: листовую или плёночную полимерную заготовку нагревают до температуры высокоэластического состояния, а затем, деформируя её различными способами, придают последней необходимую форму, фиксация которой осуществляется путём охлаждения отформованного изделия.

В зависимости от способа создания движущей силы процесса деформирования заготовки в готовое изделие различают следующие методы термоформования пластмасс: вакуумный, пневматический, гидравлический, механический, комбинированный.

При вакуум-формовании (рис. VI.62) плоскую заготовку 3 из термопластичного полимерного материала, прижатую по периметру к рабочей камере вакуум-формовочной машины прижимной рамой 2, сначала с помощью нагревательного устройства 1 разогревают до высокоэластического состояния (рис. VI.62,а). Затем (рис. VI.62,б) в полости, образованной поверхностями заготовки 3 и формующей матрицы 4 (или формующего пуансона), создают разрежение, в результате чего за счёт возникающего перепада давления происходит формование изделия 5. После охлаждения изделия до температуры его формоустойчивости последнее извлекают из формующего инструмента (снимают с формующего инструмента), предварительно открыв прижимную раму 2.

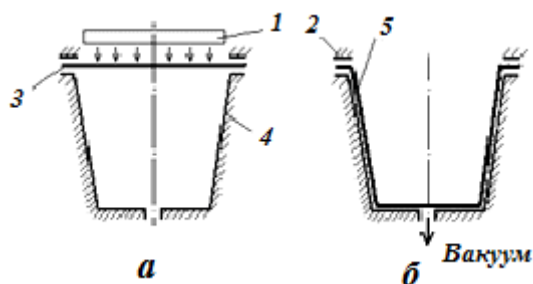


Рис. VI.62. Схема реализации процесса вакуумного формования:

1 – нагревательное устройство; 2 – прижимная рама; 3 – плоская полимерная заготовка; 4 – формующая матрица; 5 – отформованное изделие

Реализация процессов пневмоформования отличается от вакуумного формования только тем, что перепад давления создают за счёт использования в качестве рабочей среды сжатого газа, как правило, сжатого воздуха, с

избыточным давлением до $2,5 \text{ МПа}$. При гидравлическом формовании роль рабочей среды выполняет подогретая жидкость, нагнетаемая насосом под давлением $0,15 \div 2,5 \text{ МПа}$.

Механическое формование (механотермоформование) (рис. VI.63) отличается от процессов пневматического формования тем, что придание плоской разогретой заготовке 3 формы готового изделия 5 осуществляется за счёт её механической вытяжки металлическим пуансоном 4.

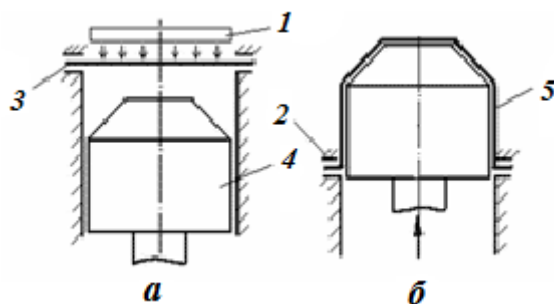


Рис. VI.63. Схема реализации процесса механотермоформования:

1 – награвательное устройство; 2 – прижимная рама; 3 – плоская полимерная заготовка; 4 – формующий пуансон; 5 – отформованное изделие

Следует отметить, что современные технологии производства предусматривают и совмещение разных методов формования изделий, например пневмовакуумное, пневмомеханическое и т.п.

Среди всех видов пневмо- и вакуум-формования можно выделить три основных: *позитивное, негативное и свободное*.

При *позитивном* формовании (формование на пуансоне) внутренняя поверхность изделия в точности воспроизводит форму или рисунок формующего инструмента.

Негативное формование (формование в матрице) даёт возможность получать изделия, наружная поверхность которых в точности воспроизводит форму или рисунок внутренней поверхности матрицы.

Свободное формование осуществляют в проеме прижимной рамы машины без использования формующего инструмента.

Кроме перечисленных основных, существуют и другие разновидности технологических процессов термоформования изделий из плоских полимерных заготовок.

Оборудование

Технологии производства из пластмасс являются малозатратными.

Литьё пластмасс под давлением осуществляется на специальных инжекционно-литьевых машинах – термопластавтоматах (ТПА) (*рис. VI.64; VI.65; VI.66; VI.67; VI.68*).

В процессе литья специально подготовленный материал поступает в узел пластификации и зону шнека машины, где подготавливается или расплавляется, а затем под высоким давлением впрыскивается в пресс-форму через литниковые каналы, заполняя с высокой скоростью её полость, а затем, остывая, образует отливку.



Рис. VI.64. Инжекционно-литьевая машина
Оборудование для изготовления изделий из композитных материалов:



Рис. VI.65. Российское оборудование для производства пластиковых труб



Рис. VI.66. Косослойная поперечно-продольная намотка



Рис. VI.67. Линия переработки полимерных материалов

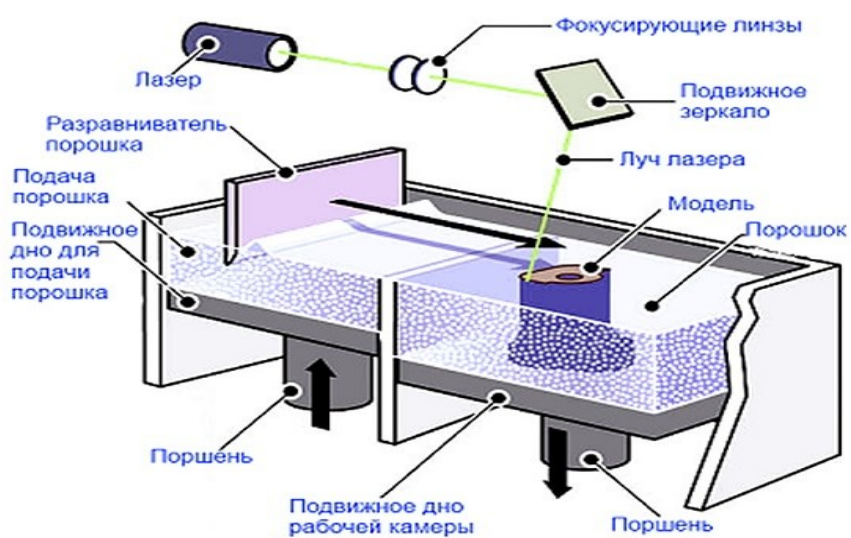


Рис. VI.68. Схема работы 3D-принтера по технологии SLS

VI.8.2. Материалы и методы создания изделий из полимеров

Все материалы по своей химической основе делятся на две основные группы: металлические *рис. VI.69,а* и неметаллические *рис. VI.69,б*.



Рис. VI.69. Группы металлических (а) и неметаллических (б) материалов

К металлическим относятся металлы и сплавы, о которых речь шла выше. К неметаллическим материалам относятся пластмассы, керамика, резина и др.

Сварка - как метод обработки пластмасс применяется для соединения деталей из термопластов контактным методом с присадочным материалом или без него (*рис. VI.70*).

Термопласты, имеющие ограниченную пластичность при нагревании (винипласт, фторопласты и др.) свариваются с применением присадочного материала в виде прутков или пасты. Реактопласты (например, стеклопластики) свариваются с присадочным материалом ТВЧ и без него или ультразвуком.

Присадочные материалы в виде прутков, подогретые горячим воздухом, а присадочные пасты в холодном состоянии плотно укладываются

в паз между соединяемыми деталями. После этого детали прижимают друг к другу и прогревают.

Без присадочного материала свариваются термопласты, приобретающие высокую пластичность в нагретом состоянии (полиэтилен, полиамиды и др.). В этом случае свариваемые поверхности, тщательно пригнанные, прижимают друг к другу под давлением $0,2 \div 0,3 \text{ МН/м}^2$ ($2 \div 3 \text{ кгс/см}^2$) и прогревают токами высокой частоты, ультразвуком или другим способом. Взаимная диффузия макромолекул приводит к соединению свариваемых поверхностей с прочностью, равной прочности основного материала.

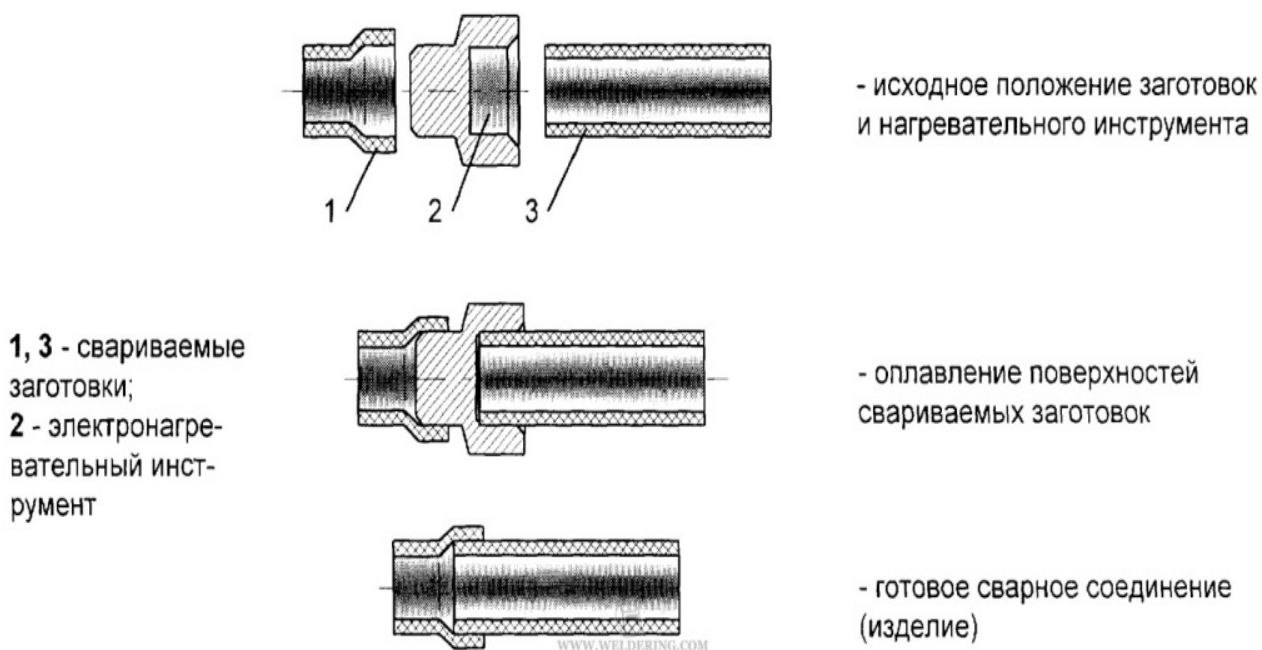


Рис. VI.70. Методы сварки пластмасс

Склеивание является одним из способов соединения пластмасс между собой, а также с металлом и другими материалами.

Органическое стекло также хорошо склеивается 3%-ным раствором полиметилметакрилата в дихлорэтано, однако склеенная им поверхность становится матовой, что является существенным недостатком. Прочность клеевого соединения зависит от правильного подбора клея, качества

подготовки склеиваемых поверхностей, толщины клеевой пленки, точности соблюдения режимов склеивания, конструкции соединения.

Клеевое соединение прочнее, надежнее и экономичнее соединений на заклепках.

Примеры изделий из полимеров и пластиков приведены на рисунках VI.71; VI.72; VI.73.



Рис. VI.71. Полимеры, пластики, стекломатериалы



Рис. VI.72. Изделия из фторопласта



Рис. VI.73. Изделия из фторопласта и его композитов

Процессы изготовления изделий из стеклопластиков и углепластиков приведены на рисунках VI.74 и VI.75.



Рис. VI.74.



Рис. VI.75.

ЛИТЕРАТУРА

Список первоисточников к Главе I

1. Гуляев, А. П. *Металловедение: учеб. для втузов* / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986 – 542 с.
2. Киттель Ч. *Введение в физику твердого тела. Учебное руководство.* // Пер. с четвёртого американского издания А.А. Гусева и А.В. Пахнева. (Под общей редакцией А.А. Гусева). – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1978 г.
3. Шимони К. *Физическая электроника* / Пер. с нем. Ю.Н. Сурского и Н.М. Фонштейн под ред. В.И. Раховского. – М.: «Энергия», 1977.
4. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. *Физика полупроводников.* – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1977 г.
5. Джафаров Т.Д. *Дефекты и диффузия в эпитаксиальных структурах.* Л.: «Наука», 1978.
6. Григоров С.Н., Косевич В.М. и др. *Электронно-микроскопические изображения дислокаций и дефектов упаковки. Справочное руководство.* /Под ред. В.М. Косевича и Л.С. Палатника. – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1976 г.
7. Волков, Г. М. *Материаловедение: учеб. для техн. вузов по немашиностроительным направлениям и специальностям* / Г. М. Волков, В. М. Зуев. – М.: Академия, 2008 – 398 с. (Сер. Высшее профессиональное образование, Технические специальности). – ISBN 978-5-7695-4248-0.
8. Сыркин В.Г. *Материалы будущего. О нитевидных кристаллах металлов.* М., 1990.
9. Конспект лекций по атомной физике. Учебное пособие. Ч.2. / Горяга Г.И. Издательство Московского университета, 1977. - 374 с.
10. Гуляев, А.П. *Металловедение: учеб. для втузов* / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986 – 542 с.

Список первоисточников к Главе II

1. Адаскин, А.М. *Материаловедение в машиностроении: учеб. для бакалавров* / А. М. Адаскин [и др.]. – М.: Юрайт, 2013 – 535 с. – ISBN 978-5-9916-2867-9. – (Сер. Бакалавр. Углубленный курс).
2. Гелин, Ф. Д. *Металлические материалы: справочник* / Ф. Д. Гелин. – Минск: Выш. шк., 1987 – 368 с.
3. Геллер, Ю.А. *Материаловедение: учеб. пособие для вузов* / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахитадт; под ред. А.Г. Рахитадта. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989 – 456 с. – ISBN 5-229-00228-X.

4. Пучков П.В. Микроструктурный анализ углеродистых конструкционных сталей // NovaInfo.Ru (Электронный журнал.) – 2016 г. – № 53. С. 25-30
5. Гуляев, А.П. Металловедение: учеб. для вузов / А.П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986 – 542 с.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г.В. Борисенок [и др.] ; под ред. Л.С. Ляховича. – М. : Металлургия, 1981 – 424 с.
7. Иванов В.Н. Словарь справочник по литейному производству. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с. – ISBN 5-217-00241-1
8. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов. Справочник. – М.: Металлургия, 1980. - 296 с

Список первоисточников к Главе III

1. Дриц М.Е., Москалёв М.А. Технология конструкционных материалов и материаловедение: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1990 – 447 с.
2. Металловедение и технология металлов. Учебник для вузов / Солнцев Ю.П., Веселов В.А., Демянцевич В.П. и др. М.: Металлургия, 198 –
3. Мозберг Р.К. Материаловедение: Учеб. пособие для техн. вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1991 – 448 с.
4. Улиг Г.Г., Ревы Р.У. Коррозия и борьба с ней. – Л.: Химия, 1989.
5. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей и чистых металлов: Справочник. М.: Металлургия, 1990
6. Клинов И.Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы. М.: Машиностроение, 1967
7. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник. В 2-х т. / Под ред. А.А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987
8. Бялобжеский А.В., Цирлин М.С., Красилов Б.И. Высокотемпературная коррозия и защита сверхтугоплавких металлов. - М.: Атомиздат, 1977.
9. Е.М. Борисова, С.М. Решетников, О.Р. Бакиева, [и др.] Коррозионно-электрохимическое поведение образцов армко-железа, подвергнутых имплантации ионами азота // Ж. Коррозия: материалы, защита. – 2018. – № 4. – С. 1–8.
10. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: учебник для вузов. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983 – 352 с.
11. Механические свойства металлов: учебник для вузов. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983 – 352 с.
12. ГОСТ 1497-84(ИСО 6892-84). Группа В09. Межгосударственный стандарт. Металлы. Методы испытаний на растяжение (Metals. Methods of tension test). МКС 77.040.10. ОКСТУ 0909
13. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.

14. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. М.: 1998.
15. ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» (Measurements microhardness by diamond instruments indentation).
16. ГОСТ 9012-59 (ИСО 410-82, ИСО 6506-81) Межгосударственный стандарт. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю (Metals. Method of Brinell hardness measurement).
17. ГОСТ 2999-75 (СТ СЭВ 470-77). Государственный стандарт СССР. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу (Metals and alloys. Vickers hardness test by diamond pyramid).
18. ГОСТ 9013-59. (ИСО 6508-86). Межгосударственный стандарт. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. (Metals. Method of measuring Rockwell hardness).
19. ГОСТ 25.502-79. Межгосударственный стандарт. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. (Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing).
20. Сопротивление материалов. Феодосев В.И., Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1972 г., 544 стр.
21. Справочник металлиста. В 5 т. 3-е изд., перераб.; Под ред. С.А. Чернавского и В.Ф. Решикова. – М.: Машиностроение, 1976
22. Материалы в машиностроении. Выбор и применение: Справочник в 5 томах под ред. Лужникова Л.П. – М.: Машиностроение, 1967
23. Технология конструкционных материалов / Под ред. А.М. Дальского.- М.: Машиностроение, 1992 - 448 с.
24. ГОСТ 6130-71. Государственный стандарт СССР. Металлы. Методы определения жаростойкости. (Metals. Methods of determining heat resistance).
25. Испытание материалов. Справочник. Под ред. Х. Блюменауэра /Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1979 – 448 с.
26. Колачев Б.А. и др. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник / Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. – М.: Металлургия, 1972 – 480 с.
27. ГОСТ 9454-78. Государственный стандарт СССР. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах (Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature).
28. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1983.
29. Фетисов Г.П. и др. Материаловедение и технология металлов: Учеб. для машиностр. спец. вузов / Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. – М.: Высшая школа, 2000 – 638 с.
30. Материаловедение: Учебник для втузов / Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986.– 384 с.

31. Шведков Е.Л., Денисенко Э.Т., Ковенский И.И. Словарь-справочник по порошковой металлургии. — К., 1982. — 272 с.

32. А.П. Гуляев «Металловедение». — М.: Издательство «Металлургия», 1977.

Список первоисточников к Главе IV

1. А.П. Гуляев «Металловедение». — М.: Издательство «Металлургия», 1977.

2. Металловедение. Т. 1 / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной [и др.]. М.: Изд-во Дом МИСиС, 2009 496 с.

3. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов: Учебник для мет. спец. вузов. — 2-е изд.; перераб. и доп. / Под ред. Б.Г. Лившица. — М.: Металлургия, 1980. -320 с.

4. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.] - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001 648 с.

5. Самохоцкий А.И., Кунявский М.Н. Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов.- М.: Машиностроение, 1981, 173 с.

6. Паисов И.В. Пособие к лабораторным работам по материаловедению и термической обработки металлов - М.: Металлургия, 1968, 95 с.

7. ГОСТ 28489-90. Межгосударственный стандарт. Микроскопы световые. Термины и определения. (Light microscopes. Terms and definitions) — Москва. Стандартиформ. 2006. Дата введения 01.07.91

8. Овчинников В.В. Металловедение: учебник. М.: ИД «ФОРУМ», 2012 320 с.

9. Картонова Л.В. Основы металлографии: учеб. пособие / Л.В. Картонова; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. — Владимир, 2017 — 96 с.

10. ГОСТ 1778-70 (ИСО 4967-79). Межгосударственный стандарт. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. (Steel. Metallographic methods for the determination of nonmetallic inclusions). МКС 77.080.20. ОКСТУ 0809. Дата введения 1972-01-01.

11. ГОСТ 5639-82. Межгосударственный стандарт. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна (Steels and alloys. Methods for detection and determination of grain size). МКС 77.080.20. ОКСТУ 0909. Дата введения 1983-01-01.

12. Геллер, Ю.А. Материаловедение: учеб. пособие для вузов / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахматдт; под ред. А.Г. Рахматдта. — Изд. 6-е, перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1989 — 456 с. — ISBN 5-229-00228-X.

13. Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. пособие для вузов по специальности "Металловедение и технология термической обработки металлов" / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. — Изд. 3-е, испр. и доп. — М. : МИСИС, 2001 — 414 с. — ISBN 5-8763-027-8.

14. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: МИСИС, 2001. – 328с.
15. Физика твёрдого тела (спецпрактикум). Под ред. Канцельсона А.А., Кринчика Г.С. – М.: Изд-во МГУ, 1982. - 304 с.
16. Иверонова В.И., Ревкевич Г.П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. – М.: Изд-во МГУ, 1972. - 246 с.
17. Иевлев В.М. Проспечивающая электронная микроскопия неорганических материалов. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2003.
18. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.М. Расторгуев. – М.: Металлургия, 1982. - 632 с.
19. Практическая растровая электронная микроскопия. Под редакцией Дж. Гоулдстейна и Х. Яковица. - М.: «Мир», 1978. -656 с.
20. Быков Ю.А., Карпухин С.Д., Бойченко М.К., Чепцов В.О. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. Аппаратура, принцип работы, применение. Учебное пособие, МГТУ им. Н.Э. Баумана.
21. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. Под общ. Ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 2004.

Список первоисточников к Главе V

1. ГОСТ 1778-70. Металлографические методы определения неметаллических включений.
2. Металловедение. Т. 1 / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, В.К. Портной [и др.]. М.: Изд-во Дом МИСиС, 2009 496 с.
3. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.] - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001 648 с.
4. Механические свойства металлов: учебник для вузов. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1983 – 352 с.
5. ГОСТ 1497-84(ИСО 6892-84). Группа В09. Межгосударственный стандарт. Металлы. Методы испытаний на растяжение (Metals. Methods of tension test). МКС 77.040.10. ОКСТУ 0909
6. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 230 с.
7. Лахтин Ю.М., Леонтьев В.П. Материаловедение. - М.: Машиностроение, 1980, -405 с.
8. ГОСТ 6130-71 Группа В09. Государственный стандарт СССР. Металлы. Методы определения жаростойкости. (Metals. Methods of determining heat resistance).

9. Самохоцкий А.И., Кунявский М.Н. *Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов.* - М.: Машиностроение, 1981, 173 с.
10. Паисов И.В. *Пособие к лабораторным работам по материаловедению и термической обработки металлов* - М.: Металлургия, 1968, 95 с.
11. Картонова Л. В., Кечин В.А. *Основы материаловедения: Учебное пособие* / Л.В. Картонова, В.А. Кечин; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир, 2014 – 179 с.
12. ГОСТ Р 54384-2011 (ЕН 10020:2000). Группа В00. *Национальный стандарт российской федерации. Сталь. Определение и классификация по химическому составу и классам качества. (Steel. Definition and classification by chemical composition and classes of quality).*
13. Томашов Н.Д. *Титан и коррозионностойкие сплавы на его основе.* – М. Изд-во «Металлургия», 1985 г.
14. *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник.* // Автор(ы): А.А. Ильин, Б.А. Колачёв, И.С. Полькин / Издательство: ВИЛС-МАТИ, 2009 г.
15. Борисова, Г.А. Бовчар, М.Я. Брун и др. *Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов.* - М. Изд-во «Металлургия», 1980 г.
16. Сучков Д.И. *Медь и её сплавы.* - М. Изд-во «Металлургия», 1966 г.
17. ГОСТ Р 55375-2012. Группа В51. *Национальный стандарт российской федерации Алюминий первичный и сплавы на его основе. Марки. (Primary aluminum and alloys based on it. Grades.)*
18. Квасов, Ф.И. Фридляндер И.Н. *Алюминиевые сплавы типа дуралюмин* - М.: Металлургия, 1984. - 240 с.
19. *Конструкционные материалы: Справочник* / Б.Н. Арзамасов, В.А. Бромстрем, Н.А. Буше и др. - М.: Машиностроение, 1990. - 668 с.
20. Кацнельсон М.Ю., Беляев Г.А. *Полимерные материалы: Справочник.* – Л.: Химия, 1982. -317 с.
21. Михайлин Ю.А. *Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы* // Ю.А. Михайлин. СПб.: Профессия 2006 С. 528–623.
22. Михайлин Ю.А. *Технологические и эксплуатационные характеристик полиимидных связующих, препрегов и имидопластов типа PMR (обзор)* // Пластические массы. №3, 1984, С. 17–23.
23. *Клеящие материалы. Справочник.* Автор(ы): А.П. Петрова; Под ред. Е.Н. Каблова. Издательство: Каучук и резина. Год: 2002. ISBN: 5-900800-02-4
24. *Склеивание металлов и пластмасс.* Автор(ы): Л. Ковачич. Под ред. А.С. Фрейдина. Издательство: Химия. Год: 1985.
25. Макмиллан П.У. *«Стеклокерамика».* Пер. с англ. - М., 1967.
26. Павлушкин Н.М. *«Основы технологии ситаллов».* - М., 1970.
27. Бережной А.И. *«Ситаллы и фотоситаллы».* - М., Машиностроение, 1981.

28. Мармер Э.Н. Углеродистые материалы. М.: Металлургия, 1973. 136 с.
29. Брызгалов Г.И. Проектирование деталей из композиционных материалов волокнистой структуры. -М.: Машиностроение, 1982. 84 с.
30. Справочник по композиционным материалам / В 2-х кн. Под ред. Дж. Любина. -М.: Машиностроение, 1998: Кн.1. 488 с.
31. Композиционные материалы: Справочник / В.В.Васильев, В.Д.Протасов, В.В. Болотин и др. -М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
32. Стекланные волокна / М.С.Асланова, Ю.И.Колесов, В.Е. Хазанов и др. Под ред. М.С. Аслановой. -М.: Химия, 1979. 256 с.
33. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. -М.: Химия, 1981. 230 с.
34. Козомазов В.Н. и др. Прочность композитных материалов. / В.Н. Козомазов, А.Н. Бобрышев, В.Г. Корвяков, В.И. Соломатов. - Липецк: НПООРИУС, 1996.-105 с.

Список первоисточников к Главе VI

1. Рогов, В. А. Современные машиностроительные материалы и заготовки : учеб. пособие для вузов по направлениям "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств", "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – М.: Академия, 2008 – 330 с. – ISBN 978-5-7695-4254-1. – (Сер. Высшее профессиональное образование, Машиностроение).
2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г. В. Борисенко [и др.] ; под ред. Л. С. Ляховича. – М. : Металлургия, 1981 – 424 с
3. Методы получения заготовок деталей машин: учебное пособие / В. Ф. Пегашкин, Е. В. Пегашкина; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016 – 81 с.
4. ГОСТ 26645-85. Государственный стандарт СССР. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку. (Metal and alloy castings. Dimensions and mass tolerances and machining allowances).
5. ГОСТ 26358-84. Межгосударственный стандарт. Отливки из чугуна. Общие технические условия (Cast iron castings. General specifications)
6. ГОСТ 18169-86. Группа Г00. Государственный стандарт СССР. Процессы технологические литейного производства. Термины и определения. (Foundry technological processes. Terms and definitions).
7. Журавлев, В. Н. Машиностроительные стали: справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992 – 480 с. – ISBN 5-217-01306-0.

8. ГОСТ 18169-86. Группа Г00. Государственный стандарт СССР. Процессы технологические литейного производства. Термины и определения. (Foundry technological processes. Terms and definitions).

9. ГОСТ ИЕС 60519-8-2015. Группа Е75. Межгосударственный стандарт. Установки электронагревательные. Безопасность. Часть 8. Частные требования к печам электрошлакового переплава. (Safety in electroheat installations. Part 8. Particular requirements for electros slag remelting furnaces).

10. ГОСТ 2590-2006. Группа В22. Межгосударственный стандарт. Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент. (Round hot-rolled steel bars. Dimensions).

11. ГОСТ 18970-84. Группа В00. Государственный стандарт СССР. Обработка металлов давлением. Операцииковки и штамповки. Термины и определения. (Pressure metal working. Forging, closed-die forging and stamping operations. Terms and definitions)

12. Кучер А.М. Технология металлов / 4-ое изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1987. - 214 с.

13. Черпаков Б. И. Металлорежущие станки: Учеб. пособие / Б. И. Черпаков, Т. А. Альперович. – М.: Изд-во «Академия», 2003 368 с.

14. Схиртладзе, А.Г. Технологическое оборудование машиностроительных производств: Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов / А.Г. Схиртладзе, В.Ю. Новиков; под ред. Ю.М. Соломенцева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2002 407 с.

15. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.М. Мещерякова. 5-е изд. перераб. и доп. Т.1 М.: Машиностроение - 1, 2001. - 912 с.

16. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.М. Мещерякова. 5-е изд. перераб. и доп. Т.2 М.: Машиностроение - 1, 2001. - 944 с.

17. ГОСТ 2601-84. Группа В00. Государственный стандарт СССР. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. (Welding of metals. Terms and definitions of basic concepts).

18. ГОСТ 5264-80. Государственный стандарт СССР. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. (Manual are welding. Welding joints. Main types, design elements and dimensions).

19. ГОСТ 17359-82. Группа В00. Государственный стандарт СССР. Порошковая металлургия. Термины и определения. (Powder metallurgy. Terms and definitions).

20. ГОСТ Р 56467—2015. Национальные стандарты РФ. Системы космические. Материалы порошковые металлические и металлические композиционные. Классификация. Номенклатура показателей. (Space systems. Powder metal and metal composite materials. Classification. Nomenclature of indices).

21. ГОСТ 18227—98. (ИСО2740—86) Материалы металлические спеченные, исключая твердые сплавы. Образцы для испытания на растяжение.
22. ГОСТ 18228—94. (ИСО3325—75) Материалы металлические спеченные, кроме твердых сплавов. Определение предела прочности при поперечном изгибе.
23. ГОСТ 18318—94. Порошки металлические. Определение размера частиц сухим просеиванием.
24. ГОСТ 18442—80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
25. ГОСТ 20017—74 (ИСО 3738-1—82) Сплавы твердые спеченные. Метод определения твердости по Роквеллу.
26. ГОСТ 20018—74 (ИСО 3369—75) Сплавы твердые спеченные. Метод определения плотности.
27. ГОСТ 20019—74 (ИСО 3327—82) Сплавы твердые спеченные. Метод определения предела прочности при поперечном изгибе.
28. ГОСТ 19679-74. Группа Л29. Государственный стандарт СССР. Пластмассы. Изготовление образцов литьем под давлением и прессованием для оптических испытаний термопластов. (Plastics. Preparation of injection moulded and compression specimens for optical testing of thermoplastics).
29. ГОСТ 32310-2012 (EN 13164:2008) Межгосударственный стандарт. Изделия из экструзионного пенополистирола XPS теплоизоляционные промышленного производства, применяемые в строительстве. Технические условия. (Factory made thermal insulation products of extruded polystyrene foam (XPS) for building. Specifications).
30. ГОСТ Р 50962-96. Группа Л26. Государственный стандарт РФ. Посуда и изделия хозяйственного назначения из пластмасс. Общие технические условия. (Plastics vessels and articles for economic purposes. General specifications).
31. ГОСТ 27358-87. Межгосударственный стандарт. Пресс-формы для изготовления изделий из пластмасс. Общие технические условия (Press moulds for manufacturing of plastic articles).

Учебное издание

Иванников Валерий Павлович

***ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ.
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ***

Учебное пособие

Авторская редакция

Подписано в печать . Формат 60х84 (1/16).

Усл. Печ.л. . Уч.-изд. л.

Тираж экз. Заказ №

*Издательский центр «Удмуртский университет»
426034, Ижевск, Университетская, д. 1, корп. 4, каб. 207
Тел./факс: +7 (3412) 500 295 E-mail: editorial@udsu.ru*